SCIENCES ET AVENIR

©VINCENT M/ANDIA.FR - R.HARDING/HEMIS.FR
PHOTOMONTAGE SETA

Déchets nucléaires

La solution Myrrha

p.24

LA FIN DU GULF STREAM

L'hiver polaire en Europe

p.38

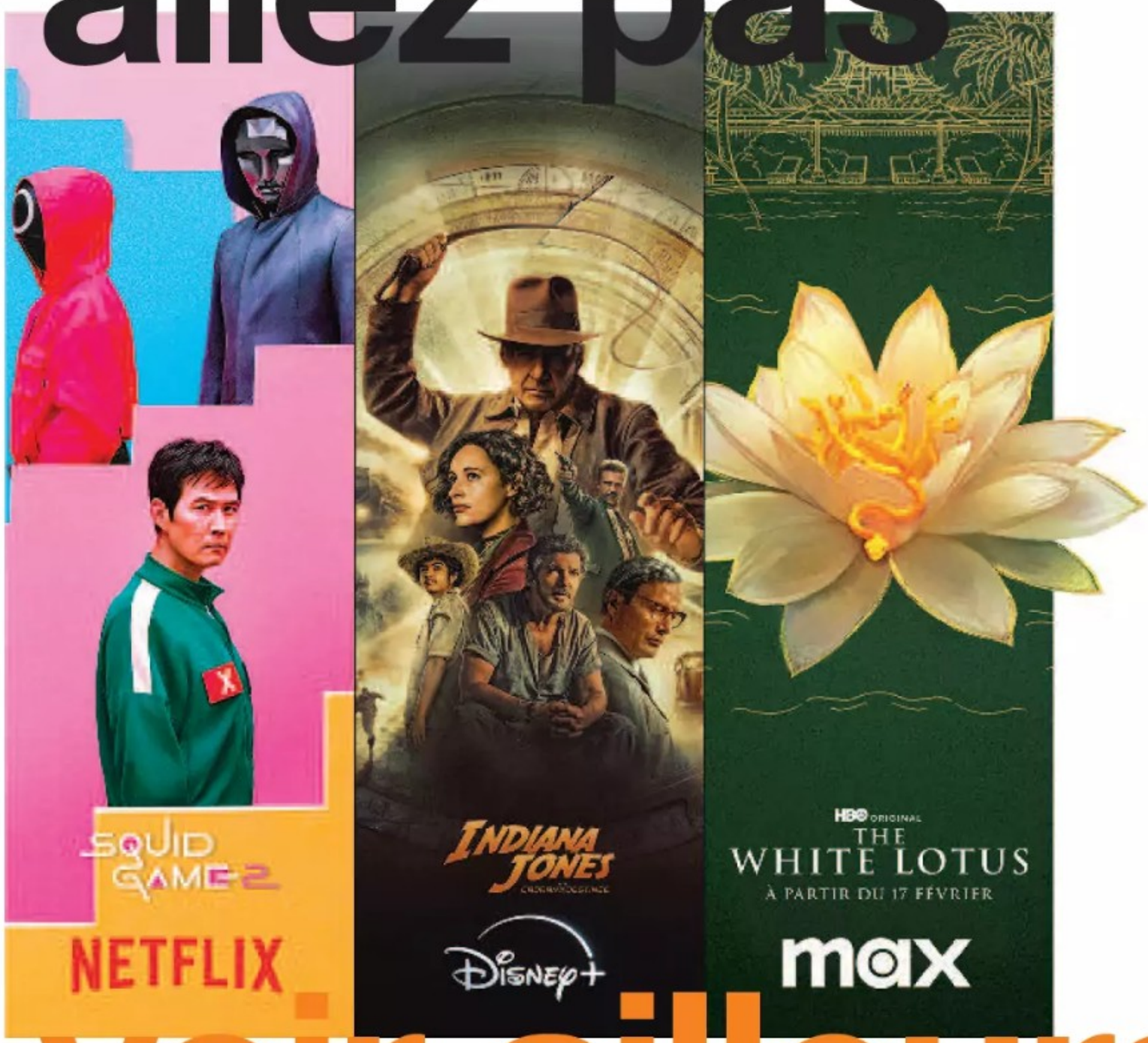
44 scientifiques sonnent l'alerte

SCIENCES ET AVENIR - N° 937 - MARS 2025 - LA FIN DU GULF STREAM

MARS 2025 - N° 937 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 €
DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 937 S - F: 5,30 € - RD

N’allez pas



voir ailleurs

-5 €/mois
et par plateforme de streaming*
remise cumulable,
sur tous les abonnements
avec ou sans pub(1).

La Fibre Orange vous offre des mois et des mois de plaisir sur Netflix, Disney+ et Max

Disponible avec l’offre Livebox Max.

***Offre soumise à conditions, engagement 12 mois, en France métropolitaine. Avec l’offre Livebox Max à 57,99 €/mois (prix hors promotion), sous réserve d’éligibilité, avec décodeur compatible (frais de mise en service : 40 €). Souscription de la ou des plateformes en plus auprès d’Orange dans un délai de 3 mois suivant la mise en service de l’offre Livebox Max et activation du compte de la plateforme selon les conditions générales d’utilisation de chacune. Remise(s) appliquée(s) sur la facture Orange. Liste des plateformes au 06/02/25 susceptible d’évolution. Perte de la remise en cas de résiliation après les 3 mois. Frais de résiliation Livebox : 50 €. Détails et tarifs sur orange.fr**

(1) Hors Netflix Essentiel. Disney et ses sociétés affiliées. ©2025 & TM Lucasfilm Ltd.

orange™ est là

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Effrayant paradoxe

Jusqu'ici le risque était théorique, désormais les premières mesures l'ont avéré : les courants marins chauds qui donnent naissance aux vents doux qui eux-mêmes tempèrent notre climat ont commencé à s'affaiblir (*p. 38*). Et si le réchauffement se poursuit, ils s'arrêteront. Quand ? Peut-être dans un siècle, mais peut-être aussi d'ici à vingt ans, s'interrogent des scientifiques qui ont trop peu de données pour nourrir correctement leurs modèles. Mais ce jour-là, l'Europe du Nord, mais aussi la France, montreront un tout autre visage que celui dépeint jusqu'à présent dans un contexte de réchauffement : ce sera le retour des hivers extrêmement rigoureux, avec des niveaux parfois invivables. Nous grelotterons alors que la planète sera en surchauffe ! Effrayant paradoxe qui rappelle une fois de plus l'extraordinaire complexité de la machinerie climatique. Un paramètre change et tout est bouleversé. Et l'on aurait tort de penser que cela pourrait être une bonne nouvelle. Car ce bouleversement s'accompagnera d'une modification des précipitations, en Europe comme dans le monde entier. Avec un impact majeur sur l'agriculture.

L'extraordinaire complexité de la machinerie climatique : un paramètre change et tout est bouleversé

En attendant, les glaces continuent de fondre et livrent d'étonnantes surprises, comme cette chaussure appartenant à Andrew Irvine qui vient d'être retrouvée sur les pentes de l'Everest (*p. 77*). Voilà cent ans que le corps du malheureux explorateur a disparu. A-t-il été, avec George Mallory, le premier à avoir atteint le plus haut sommet du monde ? L'enquête se poursuit. Bonne lecture ! ■

DOMINIQUE LEGLU QUITTE LA RÉDACTION

Une page se tourne à la rédaction de *Sciences et Avenir* : après vingt-deux ans au service du journal, Dominique Leglu a fait valoir ses droits à la retraite. Directrice de la rédaction puis directrice éditoriale, elle a toujours été une journaliste passionnée, une enquêtrice infatigable et une voix exigeante pour la vulgarisation scientifique. Son énergie, sa rigueur et son audace ont fait de *Sciences et Avenir* le premier magazine scientifique en France. Toute la rédaction lui adresse un immense merci et lui souhaite le meilleur pour la suite !

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (enquêtes) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. BRACONNIER, A. CARLIEZ, J. DE COUCY, R. GOERGEN, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, L. MAROLLÉ, K. NIKITINE, M. PARRA, A. REZGUI, J. RODIER, E. TISSANDIÉ
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement : Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » et un message « First Voyages » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi que les messages « Paris Match » et « L'Homme Moderne » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

Découvrez les Comptes Ados d’Instagram avec nos protections intégrées les plus fortes.

Comptes privés

Les Comptes Ados sont privés par défaut.

Mise en relation bloquée

Les ados ne peuvent pas être contactés par des personnes avec lesquelles ils ne sont pas connectés.

Filtrage du contenu et des commentaires

Aide à s’assurer que ce que les ados voient est adapté à leur âge.

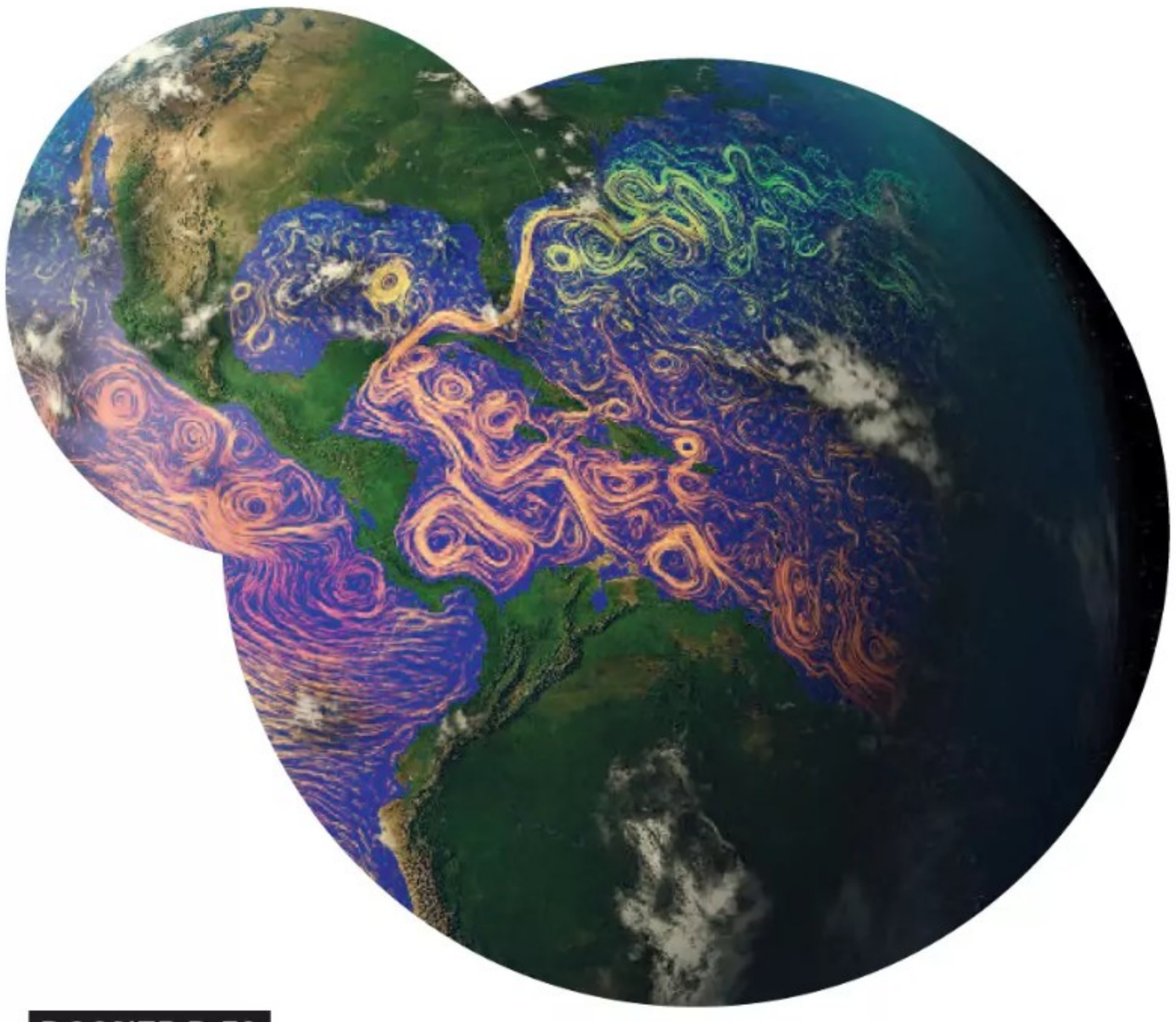
Accord parental requis

Les parents doivent approuver toute modification des paramètres par défaut pour les ados de moins de 16 ans.

En savoir plus sur la façon dont les Comptes Ados d’Instagram aident à mieux protéger les ados : instagram.com/ComptesAdos

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 937 / Mars 2025



DOSSIER P. 38

La fin du Gulf Stream ?

Une lettre ouverte signée par 44 des meilleurs climatologues alerte sur le risque imminent d'un ralentissement, voire d'un arrêt des courants océaniques de l'Atlantique, avec comme conséquence un grand coup de froid en Europe. Le climat et les conditions de vie sur la planète seraient durablement déréglés. Explications.

P. 24

Transmutation : réduire la durée des déchets nucléaires

Le projet Myrrha comporte un accélérateur de particules et un réacteur capable de fissionner les noyaux issus des combustibles usés, réduisant leur radiotoxicité de 300 000 à 300 ans ! Visite guidée.

P. 62

Handicap : course vers l'autonomie augmentée

Des laboratoires s'affrontent au Cybathlon pour proposer des robots innovants d'assistance à des personnes en situation de handicap, non sans soulever des questions éthiques. Panorama.

P. 76

L'énigme de la conquête de l'Everest relancée

La chaussure d'Andrew Irvine vient de réapparaître sur les pentes de l'Everest et, avec elle, un des plus grands mystères de l'alpinisme : que s'est-il passé le 8 juin 1924 ? Embarquez pour l'enquête.

3 **Édito** par Mathieu Nowak

6 **Courrier**

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Un neutrino d'une énergie record détecté / Une ancienne activité tectonique sur Mars

24 **Transmutation : réduire la durée de vie des déchets nucléaires**

30 **Le laser, une révolution pour communiquer avec l'espace**

34 **La galaxie d'Andromède contiendrait moins de matière noire que prévu**

36 **Journal de l'IA : Quand un chatbot chinois bouscule le monde de l'IA**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Un iceberg géant à la dérive / Les ours polaires ont un poil antigel

52 **Le grand stress des marmottes alpines**

56 **À Marseille, la renaissance des fonds marins**

58 **Les États-Unis déchirés entre or noir et or vert**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Nos oreilles bougent pour mieux entendre / Reprogrammer les cellules tumorales, c'est possible

62 **Handicap : une course vers l'autonomie augmentée**

68 **Comment les larmes réduisent l'agressivité des hommes**

71 **Vitiligo, l'espoir d'une peau repigmentée**

74 **Nutrition : Le quinoa, une petite graine pleine d'atouts**

HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** La résidence royale de la tapisserie de Bayeux / Stonehenge, symbole d'unité pour les peuples de l'île

76 **Everest : une découverte relance l'énigme de sa conquête**

81 **À la recherche du son des instruments disparus**

84 **Sur les traces du nouveau « T. rex »**

86 **Histoire des sciences : La vie latente, aux limites du vivant**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

93 **Expositions**

94 **Chroniques**

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel de mars**

98 **Jeux**

KARSTEN SCHNEIDER / SPL / SUCRÉ SALÉ - FRANÇOIS GUÉNET/DIVERGENCE POUR « SCIENCES ET AVENIR » - ETH ZURICH / CYBATHLON / ALESSANDRO DELLA BELLA - MARY EVANS/SIPA

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Les super-pouvoirs de la respiration »
Sciences et Avenir n° 936, février 2025

Dans votre dossier, vous évoquez l'hyperventilation pendant laquelle on évacue en accéléré le dioxyde de carbone sanguin. Vous indiquez, page 60, qu'elle se produit en cas de crise de panique et qu'elle entraîne ainsi une cascade de réactions chimiques perturbant l'activité nerveuse, avec un cortège de symptômes tels que vertige, picotements, crampes… Plus loin, page 63, vous écrivez qu'en cas de douleur, nous avons tendance à respirer plus vite et par conséquent à produire exactement le même processus d'hyperventilation, mais cette fois, cela entraîne, au contraire, un effet antalgique ! Merci de m'éclairer sur ce qui m'apparaît comme une contradiction mais qui est peut-être dû à une mécompréhension de ma part. **Marie-Renée Lepoivre**

S. et A. : Les deux effets ne sont pas contradictoires. L'hyperventilation fait chuter le taux de dioxyde de carbone dans le sang, ce qui perturbe les flux de particules chargées entre les neurones, et de là l'activité de ces derniers. Il s'ensuit une diminution de l'activité des centres cérébraux de la douleur, mais aussi diverses autres modulations de l'activité cérébrale à l'origine de vertiges, picotements, crampes. Certains travaux suggèrent en outre que chez la plupart des gens, l'hyperventilation provoque une libération d'endorphines — une sorte de morphine naturelle produite par le cerveau —, ce qui, d'une part, empêche que ces manifestations physiques ne déclenchent une angoisse trop forte, et d'autre part, renforce l'effet antidouleur. Ce système serait déficient chez les personnes qui souffrent d'une anxiété pathologique, d'où, au moins dans certains cas, leur vulnérabilité aux crises de panique.

Siffler en respirant

Dans votre dossier sur la respiration je n'ai pas lu d'étude sur ce qui se passe quand on siffle une chanson au lieu de la chanter. J'ai, comme certaines personnes, la faculté de siffler des mélodies et chansons complètes en inspirant et expirant en continu sans m'essouffler, parfois même en faisant du vélo. Est-ce que je suis un extraterrestre ? Ai-je une malformation ? Ou bien suis-je normal ? **Jean-Marc Levrault**

S. et A. : Nos capacités respiratoires sont surdimensionnées par rapport à nos besoins métaboliques, de sorte que nous sommes capables de les mobiliser pour chanter — ou siffler —, même en faisant du vélo. Du moins quand ce n'est pas à une intensité extrême et quand nous avons une bonne santé respiratoire.

Pour le côté apaisant, nous ne connaissons pas d'étude sur le sujet, mais siffler une chanson lente conduit sans doute à ralentir la respiration de la même façon que si on la chantait, avec un effet apaisant. Cela reste cependant à confirmer, notamment parce que dans votre cas, il y a une différence notable : vous sifflez aussi sur l'inspiration, alors qu'on ne chante que sur l'expiration. Si vous y parvenez, explique le pneumologue et spécialiste de neurophysiologie respiratoire Thomas Similowski, c'est peut-être parce que *« siffler n'implique pas les cordes vocales, qui n'ont donc pas à être mises en vibration. La production sonore du sifflement est uniquement labiale, et peut donc fonctionner dans les deux sens. »*

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

NOUVEAU CITROËN C3 AIRCROSS

IMPOSSIBLE DE RÉSISTER AU CONFORT

À PARTIR DE

19 700 € (1)

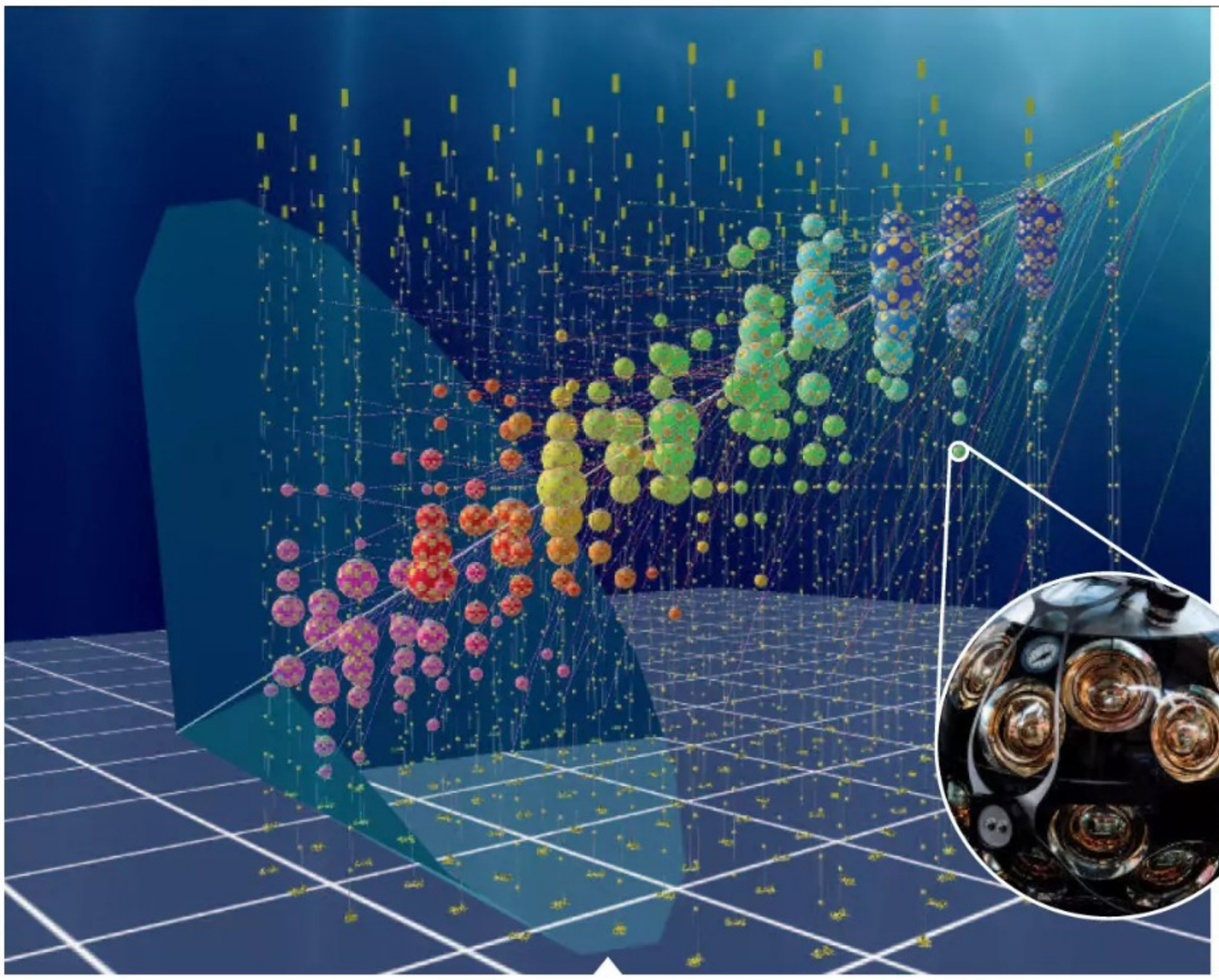
8 ans de garantie jusqu'à Citroën, We Care

A
B 120 g CO_2/km
C
D
E
F
G

Modèle présenté : Nouveau C3 Aircross Hybride 136ch MAX, boîte automatique avec option teinte Vert Montana et toit bi-ton Blanc Opale **(28 500 €)**.
(1) Exemple pour l'achat d'un Nouveau C3 Aircross YOU Turbo 100ch neuf à partir de **19 700 €**, hors option. Montants exprimés TTC. Offre valable jusqu'au **31/03/25** réservée aux personnes physiques, pour un usage privé, dans le réseau Citroën participant. Citroën We Care : détails sur citroen.fr.

CITROËN

Au quotidien, prenez les transports en commun. #SeDéplacerMoinsPolluer



KM3NET

Modélisation du détecteur KM3NeT : les sphères de verre (en médaillon) ont capturé la lumière émise par un muon (cône bleu à gauche), né de la rencontre entre le neutrino et un noyau d'atome.

Un neutrino d'une énergie record détecté

Un télescope immergé en Méditerranée a observé un neutrino d'une ultra-haute énergie. Cette découverte ouvre une nouvelle ère en astrophysique.

Deux cent vingt millions de milliards d'électronvolts ! C'est l'énergie que transportait un seul neutrino le 13 février 2023, lorsqu'il a été détecté par l'instrument KM3NeT (Cubic Kilometre Neutrino Telescope) immergé au large de la Sicile (Italie). C'est 30 fois plus que les neutrinos les plus énergétiques enregistrés jusqu'ici. *« Cette première détection ouvre un nouveau chapitre dans l'astronomie des neutrinos et une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers »*, a commenté Paschal Coyle, chercheur au Centre de physique des particules de Marseille (CNRS) et coauteur de la découverte publiée dans *Nature* par une collaboration internationale réunissant 350 scientifiques issus de 68 laboratoires. À notre échelle, cela correspond à l'énergie cinétique d'une balle de tennis roulant à 4 km/h. Mais qu'une particule aussi infime puisse transporter autant d'énergie est un événement. Bien que les neutrinos soient les particules les plus abondantes derrière les photons, leur faible interaction avec la matière rend leur détection difficile. Il faut des instruments gigantesques comme KM3NeT, qui n'est pas encore achevé, pour y parvenir. Le réseau de capteurs occupera un volume de l'ordre du kilomètre cube, immergé par 3450 mètres de profondeur en Méditerranée. KM3NeT comprend un autre détecteur, Orca, également en cours d'assemblage par 2450 mètres de fond au large de Toulon.

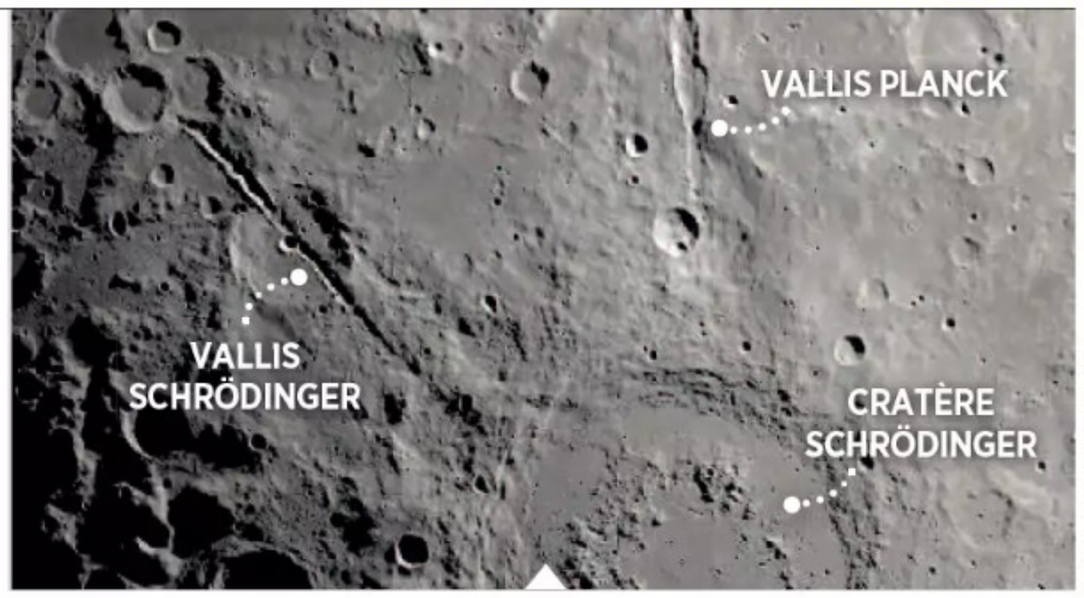
Mais pourquoi aller chercher des neutrinos au fond de l'eau ? Parce que leur détection n'est pas directe et nécessite de ruser. Lorsqu'un neutrino heurte un noyau d'atome, il produit un muon, une autre particule élémentaire. Si l'énergie du neutrino est suffisante, le muon est propulsé à très grande vitesse, dépassant celle de la lumière dans l'eau — mais pas la vitesse de la lumière dans le vide, indépassable. Il engendre alors un « effet Cherenkov », une émission de lumière bleutée — analogue au « bang » supersonique, mais dans l'optique — qui trahit sa présence. Cette lumière a été captée par KM3NeT avec seulement un dixième de la configuration finale du détecteur, ce qui est très encourageant pour la suite.

Une origine extragalactique

L'astrophysique attend en effet beaucoup de ces messagers particuliers. Les neutrinos de très haute énergie sont produits par certains des phénomènes les plus violents de l'Univers, des « accélérateurs cosmiques naturels ». Par exemple, les trous noirs supermassifs au centre des galaxies qui émettent des jets de particules, les sursauts gamma, ou encore l'effondrement d'étoiles massives de type supernovae… Pour l'heure, avec un seul neutrino, les chercheurs ne peuvent pas encore conclure quant à son origine. Seul indice : sa direction indiquerait qu'il ne vient pas de notre galaxie, mais d'au-delà. **F. N.**

Des canyons lunaires formés en 10 minutes

Des simulations ont permis d'estimer la vitesse de projection des fragments d'un premier impact d'astéroïde.



NASA\SVS\ERNIET. WRIGHT.

Il y a 3,8 milliards d'années, l'impact d'un astéroïde a créé le cratère Schrödinger et, dans la foulée, Vallis Schrödinger et Vallis Planck.

Deux balafres aux dimensions comparables à celles du Grand Canyon dans le Colorado (États-Unis), creusées en moins de 10 minutes sur la Lune, il y a 3,81 milliards d'années… C'est l'incroyable scénario décrit par une étude dans *Nature*. Celui d'un astéroïde ou d'une comète de 25 km de diamètre ayant libéré, à l'impact, une énergie équivalente à 130 fois l'arsenal nucléaire mondial pour former le cratère Schrödinger, de 320 km de diamètre. Outre l'éjection de blocs rocheux de plusieurs kilomètres de diamètre, la collision a produit des coulées de débris hyperrapides, comparables à des torrents de lave minérale. Ce sont ces flots qui ont sculpté Vallis Schrödinger et Vallis Planck : le premier s'étend sur 270 km de long, 20 km de large et 2,7 km de profondeur ; le second fait 280 km de long, 27 km de large et 3,5 km de profondeur. En comparaison, il a fallu 6 millions d'années d'érosion sur Terre pour creuser le Grand Canyon sur 445 km, avec une profondeur moyenne d'environ 1,3 km. **F. N.**

EN DEUX MOTS

TRANSPORT L'Agence européenne de la sécurité aérienne a homologué le premier moteur électrique destiné à propulser des avions régionaux, conçu par le français Safran. **IA** À partir de 40 composés inorganiques présents dans le vin, une équipe du CNRS a mis au point un algorithme capable d'établir l'origine d'une cuvée. **ESPACE** La société Blue Origin de Jeff Bezos a effectué avec succès le vol inaugural de son lanceur lourd, New Glenn, qui ambitionne de concurrencer SpaceX d'Elon Musk.

NASA / SIPA

Les chercheurs examinent les échantillons de Bennu rapportés sur Terre.

Les briques de la vie dans l'astéroïde Bennu

EXOBIOLOGIE Les premières analyses chimiques détaillées des échantillons de l'astéroïde Bennu, rapportés sur Terre en 2023 par la mission Osiris-Rex, ont été faites. Ce corps céleste contient des milliers de molécules organiques. Parmi elles : les cinq bases azotées constituant les molécules d'ADN et d'ARN, supports de l'information génétique chez tous les organismes vivants terrestres, et 14 des 20 acides aminés qui structurent les protéines des cellules. **F. D.**

SOURCE : DANIEL GLAVIN, NASA, ÉTATS-UNIS.

33 000 km/h La vitesse des vents sur une exoplanète

ASTRONOMIE WASP-127b, exoplanète gazeuse, bat tous les records de vents jamais mesurés jusqu'ici. Ils soufflent en altitude comme nos courants-jets (*jet-streams* en anglais), d'après des mesures réalisées au Very Large Telescope de l'Observatoire européen austral, au Chili. Un train d'enfer estimé grâce aux mouvements des molécules d'eau et de monoxyde de carbone présentes dans l'atmosphère de l'astre situé à 520 années-lumière. **F. N.**

Les États-Unis réinventent le Concorde

AVIATION Premier projet d'avion civil supersonique depuis l'arrêt du Concorde franco-britannique en 2003, l'aéronef expérimental XB-1 a passé la vitesse du son pour la première fois lors d'un vol d'essai effectué au-dessus du désert de Mojave (États-Unis). À l'origine du projet, la société américaine Boom Supersonic prévoit de lancer dès cette année la construction de plusieurs exemplaires de cet appareil pouvant transporter jusqu'à 80 passagers. Avec pour objectif une mise en service courant 2029. **H. J.**

BOOM

Le ciel chilien menacé par un projet d'usine

ASTRONOMIE Au Chili, un projet d'usine géante destinée à la production d'hydrogène vert et d'électricité solaire et éolienne inquiète l'Observatoire européen austral. S'étalant sur plus de 3000 hectares dans le désert d'Atacama, elle risque d'altérer le ciel le plus sombre du monde dont profitent le Très Grand Télescope (VLT), l'un des équipements les plus puissants, et le Télescope géant européen (ELT), en construction. **S. R.**

A. GHIZZI PANIZZA / BIOSPHOTO

Le désert d'Atacama déploie le ciel le plus pur du monde, propice à l'observation (ici le Très Grand Télescope).

SHINICHI FURUYA

Cet exosquelette aide les pianistes

BIOMÉCANIQUE Pour concilier prévention des blessures et entraînement intensif, des chercheurs en biomécanique ont mis au point cet exosquelette destiné aux pianistes de haut niveau. Il lève et abaisse séparément chaque doigt jusqu'à quatre fois par seconde sans nécessiter le moindre effort. Testé sur 118 professionnels durant 30 minutes, il a permis d'accroître leur vélocité et leur coordination tactile sur des morceaux qu'ils maîtrisaient déjà. Un progrès constaté à l'imagerie dans le cortex sensoriel des participants. **H. J.**

SOURCE : SHINICHI FURUYA, INSTITUT NEUROPIANO, JAPON

Une image globale de la magnétosphère

ESPACE Début mars, depuis la Lune, une expérience de la Nasa réalisera la première image globale de la magnétosphère, le champ magnétique qui enveloppe la Terre. Dénommée Lexi (Lunar Environment Heliospheric X-ray Imager), elle est embarquée à bord de l'atterrisseur lunaire Blue Ghost de l'américain Firefly Aerospace, lancé le 15 janvier. **F. D.**

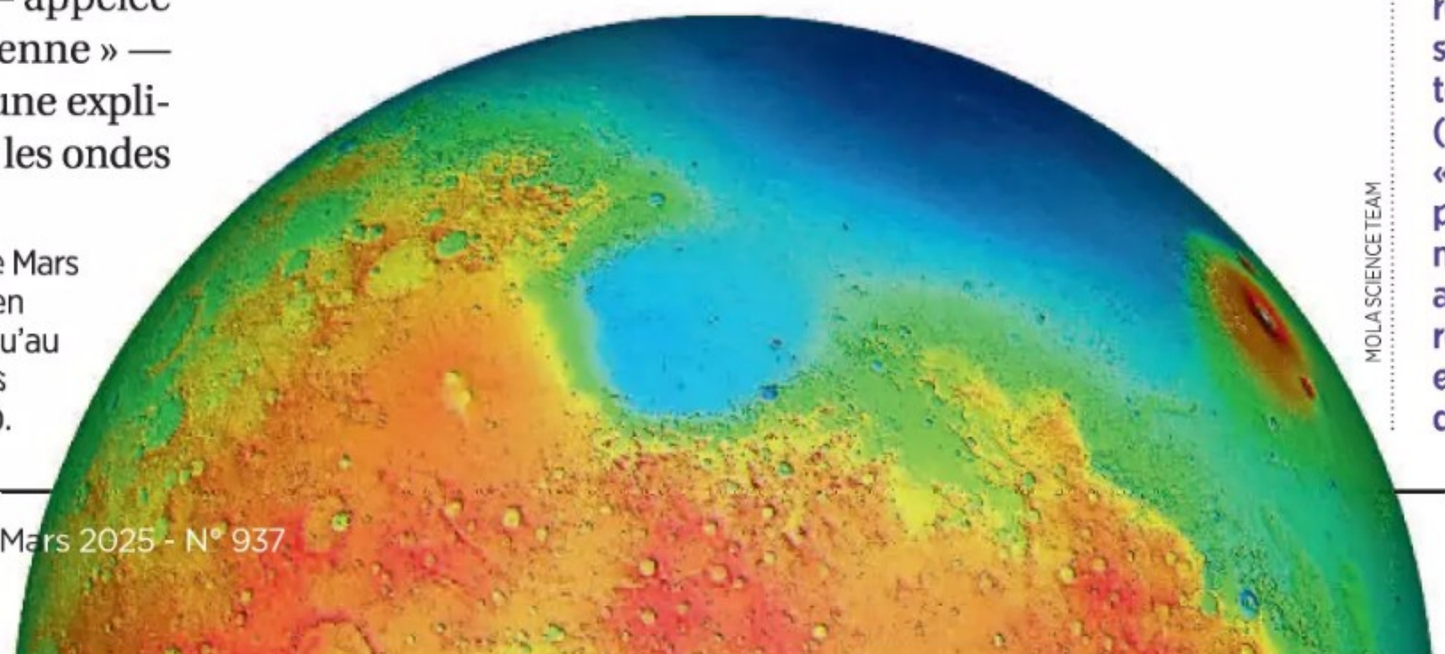
FIREFLY AEROSPACE

Blue Ghost arrivera sur la Lune début mars (vue d'artiste).

Une ancienne activité tectonique sur Mars

Elle aurait façonné la surface de la planète avant de s'interrompre et de figer les paysages dans l'asymétrie actuelle.

Pourquoi les deux tiers de l'hémisphère nord de Mars arborent-ils des plaines lisses peu cratérisées, alors que le reste de la planète est couvert de reliefs accidentés de 5 à 6 kilomètres plus hauts ? Découverte dans les années 1970 par les sondes américaines Viking, cette disparité unique dans le Système solaire — appelée « dichotomie martienne » — aurait enfin trouvé une explication. En analysant les ondes sismiques détectées en 2022 sur Mars par la mission InSight, une équipe de géologues a découvert que les roches du manteau sous les hautes terres de l'hémisphère sud étaient moins visqueuses et plus chaudes (1000 °C contre 800 °C) que celles du nord, où la croûte est par ailleurs moins épaisse. Ces différences trahiraient des mouvements de convection plus vigoureux sous l'hémisphère sud de la planète. Et suggèrent, selon les chercheurs, que des processus tectoniques auraient façonné par le passé les paysages de Mars, avant de s'interrompre et les figer dans l'asymétrie que l'on observe actuellement. **F. D.**



MOLA SCIENCE TEAM

► **L'hémisphère nord** de Mars est constitué de plaines (en majorité en bleu) tandis qu'au sud, les altitudes sont plus élevées (orange et rouge).

1337 SECONDES

Le record de durée pour un plasma de fusion

ÉNERGIE Le réacteur français West du CEA de Cadarache a maintenu un plasma de fusion nucléaire à 50 millions de degrés pendant plus de 22 minutes, battant le record établi quelques semaines plus tôt par le tokamak chinois East (1066 s). Ce type de « soleil artificiel » vise à produire une énergie nucléaire bien plus abondante que les réacteurs actuels, tout en émettant très peu de déchets. **H. J.**

« L'équipe Audika s'est chargée des démarches administratives. Je ne me suis occupé de rien ! »

Prendre soin de sa santé auditive, c'est prendre soin de sa santé tout court. Bernard, 70 ans, est suivi par les experts Audika du centre de Saint-Yrieix depuis maintenant 5 ans. Il nous raconte son expérience et pourquoi il recommande Audika.

Bernard, vous portez des aides auditives[1] depuis plusieurs années. Pourquoi avoir choisi Audika pour vous accompagner ?

Je me suis rendu compte que j'entendais très mal et que je comprenais de travers lors des échanges avec mes proches. Monique, ma femme, était déjà appareillée chez Audika et elle était très satisfaite de leurs services. Elle m'a donc parrainé ! Aujourd'hui, je suis moi aussi très content de mes aides auditives qui sont de bonne qualité avec lesquelles je n'ai eu aucun problème en 4 ans.

Qu'avez-vous pensé de l'accompagnement des experts Audika ?

Les équipes ont été très efficaces sur tout, et même sur la partie administrative. L'équipe s'est chargée des démarches auprès de la Sécurité Sociale et de ma mutuelle. Je ne me suis occupé de rien ! Ce qui nous a le plus touchés, c'est la gentillesse, la réactivité et l'accueil chaleureux que l'audioprothésiste et la coordinatrice du centre nous prodiguent. Ils forment une belle équipe et on sent tout de suite qu'il y a une bonne ambiance dans leur centre. Je peux vous dire que nous n'y allons jamais à reculons.

Vous les recommandez ?

Bien sûr, j'ai d'ailleurs déjà parrainé un habitant de ma commune !

Alors faites comme Bernard, profitez des conseils et du suivi des experts Audika.

CONDITIONS AVANTAGEUSES PARTENAIRES SANTÉ

Prenez rendez-vous dès maintenant sur audika.fr, par téléphone au :

0800 302 607 Service & appel gratuits

ou directement dans l'un des centres Audika le plus proche de chez vous.

Grâce à nos partenariats, bénéficiez de conditions avantageuses[2] et de la prise en charge complète de votre dossier administratif.

Que vous soyez ou non déjà appareillé(e), vous pouvez tester gratuitement et sans engagement, pendant 30 jours[3], les aides auditives dernière génération.

MARQUE PRÉFÉRÉE des Français

ÉLU SERVICE CLIENT DE L'ANNÉE 2025

Audika
Experts et à votre écoute

[1]Dispositifs médicaux CE. [2]Sous réserve d'être adhérent d'une complémentaire santé partenaire, voir condition en centre. [3]Sans engagement. Sur prescription médicale uniquement. Valable sur toutes les aides auditives, hors frais d'embouts. Voir conditions en centre. Marque préférée des français : Étude OpinionWay - 1 016 répondants - décembre 2024 - catégorie réseau de centres auditifs. ESCDA-Catégorie Solution auditives - Étude BVA Xsight - Viséo CI - Plus d'infos sur escda.fr. AUDIKA GROUPE, SAS au capital de 283.500€, RCS Nanterre 310 612 387, 231 rue des Caboeufs 92230 Gennevilliers.

ANDREW MILLER/CAPTURE NORTH STUDIOS - DONNÉES CARTOGR. OSM, NASA, SENTINEL-3 ; BRUNO BOURGEOIS

L'immense mur de glace (80 km de long) pourrait se fragmenter avant d'atteindre l'île britannique.

Un iceberg géant à la dérive

Coincé aux abords de l'Antarctique durant 40 ans, l'iceberg A23a dérive vers l'île de Géorgie du Sud, et menace des populations d'animaux.

Long de 80 km et haut de 30 à 40 m, l'iceberg A23a, d'une superficie équivalente à la moitié de la Corse, ne passe pas inaperçu. Enregistré en 1986 et coincé non loin des côtes australes pendant près de quarante ans, le plus grand et le plus vieil iceberg au monde s'est libéré grâce à la fonte et aux vents. Depuis 2024, il poursuit son voyage le long du courant circumpolaire antarctique. Le problème, c'est que ce bloc de glace de 3500 km² se dirige vers la Géorgie du Sud et devrait l'atteindre début mars. Selon les glaciologues et biologistes marins, l'iceberg présente une menace pour les animaux vivant sur l'île, déjà décimés par une épizootie de grippe aviaire depuis deux ans. Otaries à fourrure, albatros, mais aussi colonies de phoques et de manchots papous peuplent ce petit havre de paix particulièrement hostile aux humains.

Son avancée est surveillée par satellite

En s'échouant dans les eaux peu profondes aux abords de la Géorgie du Sud, l'iceberg A23a bloquerait les routes entre les zones d'alimentation et de reproduction des animaux. Pour aller chasser, manchots et phoques devraient alors contourner le bloc de glace : des efforts colossaux pouvant les empêcher de subvenir aux besoins de leurs nichées. Les scientifiques surveillent l'avancée de l'iceberg par satellite, car la force des courants rend sa trajectoire imprévisible. Peu susceptible de se retourner compte tenu de sa taille, il pourrait se fragmenter et ne pas atteindre l'île en un seul bloc. Auquel cas il constituerait un danger pour les navires. Malgré des proportions impressionnantes, ce mur de glace n'est pas tout à fait une anomalie. Les icebergs géants ne manquent pas. Le plus grand jamais enregistré au début des années 2000, nommé B-15, mesurait 295 km de long pour 11 000 km², avant de fondre progressivement durant sa remontée. L'anomalie, c'est plutôt le réchauffement du continent Antarctique, deux fois plus rapide que la moyenne planétaire, pouvant rendre le vêlage d'icebergs géants, et les risques associés, plus fréquents. **E. T.**

REUTERS

« Atrax christenseni » peut mesurer jusqu'à 9,2 cm.

Une araignée mortelle peut en cacher deux autres

ARACHNOLOGIE Trois espèces peuvent désormais revendiquer le titre d'arachnide la plus venimeuse du monde, toutes en Australie. L'analyse de différents spécimens d'araignée à toile-entonnoir de Sydney (*Atrax robustus*) a amené les chercheurs à définir deux nouvelles espèces : *Atrax montanus* et *Atrax christenseni*. Cette dernière peut mesurer jusqu'à 9,2 centimètres, soit deux fois plus que ses cousines. **A.-S. T.**

SOURCE : DANILO HARM, UNIVERSITÉ DE HAMBOURG, ALLEMAGNE

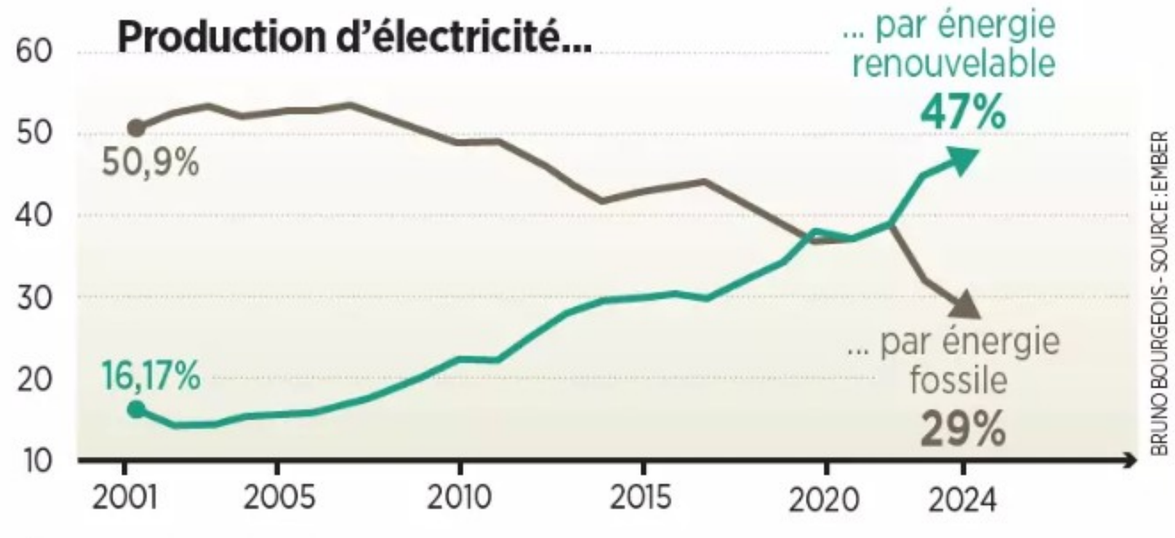
465 000 tonnes

La quantité de méthane libérée par le sabotage des gazoducs Nord Stream

POLLUTION Un groupe de travail international a pu déterminer la quantité de méthane relâchée dans l'atmosphère en septembre 2022 par le sabotage des gazoducs Nord Stream en mer Baltique. C'est la plus grande quantité de méthane jamais mesurée pour un seul événement, correspondant à 0,1 % des émissions anthropiques annuelles de ce puissant gaz à effet de serre. **R. M.**

Des zones humides à peu de frais grâce aux castors

ÉCOLOGIE Dans la région des monts Brdy (République tchèque), un groupe de castors a permis au gouvernement d'économiser 1,2 million d'euros. Ils ont en effet construit une série de barrages sur la rivière Klabava. Cette aire protégée devait être aménagée en zone humide, mais le projet a été retardé. Grâce aux castors, c'est chose faite, et sur une zone beaucoup plus vaste que prévu. **S. R.**



Électricité : le renouvelable passe en tête en Europe

ÉNERGIE **En 2024, les énergies renouvelables (eau, vent, solaire, etc.) ont atteint 47 % de la production d'électricité, en particulier grâce à une importante croissance du solaire et au redressement de l'énergie hydraulique, selon le think tank Ember. Les énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole) sont tombées à 29 %, contre 39 % en 2019. Les 24 % restants ont été assurés par le nucléaire, portant à 71 % la part d'électricité décarbonnée produite en Europe. Un record.** **E. T.**

La radioactivité des sables du Sahara n'est pas d'origine française

NUCLÉAIRE Les faibles traces de césium 137 radioactif détectées dans les poussières sahariennes, répandues en Europe de l'Ouest en mars 2022, ne proviennent pas des 17 essais nucléaires français conduits en Algérie au début des années 1960. Les 110 échantillons analysés par le CNRS portent en effet la signature de retombées globales dominées par les essais américains et soviétiques à la fin des années 1950. **H. J.**

R. CAVIGNAUX/NATURAGENCY

À VOIR SUR LE NET

La libellule, championne insoupçonnée du looping

ENTOMOLOGIE Pour évacuer rapidement la chaleur de son corps, la libellule plonge dans l'eau, en ressort à la verticale et effectue, en une fraction de seconde, une impressionnante série de saltos arrière. Une prouesse stratégique presque invisible à l'œil nu, que des biomécaniciens ont visualisée grâce à une caméra à haute vitesse. **P. K.**

SOURCE : HUAI TI-LIN, IMPERIAL COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Les ours polaires ont un poil antigel

La peau sécrète du sébum protégeant ces ursidés des conditions extrêmes.

MICHIO HOSHINO / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

La fourrure d'« Ursus maritimus » contient un film lipidique composé de cholestérol et d'acides gras empêchant la glace de se fixer.

Des poils naturellement gras ! Voilà le secret de l'ours blanc pour se trouver si confortable sur la glace ou dans la neige. Une étude de l'université de Dublin (Irlande) montre que la peau de cette espèce d'ursidé sécrète un mélange de lipides, le sébum, enrobant la fourrure et agissant comme un antigel. Un atout crucial lorsque les températures chutent à -40 °C. Pour s'en convaincre, les chercheurs ont analysé les poils de six ours polaires et comparé leur adhérence à la glace avant et après lavage. Résultat : sans son sébum, la fourrure gèle trois fois plus vite. Ce film lipidique unique, composé de cholestérol et d'acides gras, limite l'accumulation de givre et protège ainsi l'ours. Les chercheurs indiquent que leur étude confirme un savoir ancestral des Inuits, qui ont appris à préparer les fourrures de façon à conserver cette propriété permettant un déplacement silencieux. **J. de C.**

CHARLOTTE GAGNOR

QUESTIONS À

Léo Magnin

Chargé de recherche CNRS, membre du Laboratoire interdisciplinaire sciences innovations sociétés (Lisis)

« L'Office français de la biodiversité est une police d'avant-garde »

Accusée par des syndicats agricoles de multiplier les contrôles tatillons, et après avoir enregistré 87 agressions de ses agents en 2024, la « police de l'environnement » a lancé un mouvement de grève inédit.

Quelles sont les causes de cette contestation au sein de l'OFB?

Le code de l'environnement comprend des centaines d'articles à faire respecter. Or, les 1700 inspecteurs de l'OFB sont les seuls exerçant une police judiciaire de l'environnement sur le terrain. Le fait qu'ils dressent des procès-verbaux et sont armés suscite les oppositions, d'autant que les atteintes à la biodiversité sont peu poursuivies — moins de 1 % de l'activité des tribunaux de première instance.

Comment expliquer les violentes contestations des agriculteurs?

Les agriculteurs ne représentent qu'un contrôle sur cinq réalisés par l'OFB. Mais ils ne sont plus que 400 000 à gérer plus de la moitié de la surface de la France. Ces contrôles sur leur action sur l'environnement ne leur apportent que des contraintes et pas de rémunération pour des services rendus.

Pourquoi cette police reste-t-elle indispensable?

Sa singularité est qu'elle participe à la construction d'une société durable. Alors que nul ne conteste la légitimité de la police à préserver l'intégrité des personnes et des biens, la protection de la nature ne va toujours pas de soi. C'est donc une police d'avant-garde, à la fois minoritaire et réformatrice. **Propos recueillis par L. C.**

AGRI OBTENTIONS

La céréale, obtenue par croisements, résiste aux principales maladies du blé.

Le premier blé tendre « agroécologique »

AGRICULTURE Géopolis arrive dans les champs. Développée par croisements à l'Inrae, cette nouvelle semence de blé tendre (destiné à la boulangerie) est non seulement productive et riche en protéines, mais elle est aussi résistante à la septoriose, au piétin-verse et à la rouille brune, les trois principales maladies de la céréale. Géopolis va donc permettre aux agriculteurs de réduire fortement leurs épandages de produits phytosanitaires. **L. C.**

Le chocolat menacé par le réchauffement

CLIMAT Les récoltes de cacao ont été affectées par des températures ayant dépassé le seuil critique des 32 °C pendant plus de six semaines en 2024 dans la ceinture cacaoyère de l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire, Ghana, Cameroun, Nigeria). Un réchauffement qui, selon le centre de recherche indépendant Climate Central, a perturbé la photosynthèse des plants et conduit à des cabosses plus petites, et donc plus chères. **L. C.**

+54 % Le boom de l'autoconsommation électrique en 2024

ÉNERGIE Pas moins de 677 411 foyers étaient autoconsommateurs de leur électricité en France en 2024. Une augmentation de 54 % par rapport à 2023. Le coût de production du solaire photovoltaïque d'une installation de 3 à 9 kilowatts-crête (soit 3000 à 9000 watts, la puissance moyenne pour une maison individuelle) est de l'ordre de 13 à 19 centimes d'euros par kilowattheure (kWh), alors qu'en offre classique, le prix du kWh avoisine aujourd'hui les 25 centimes, affirme l'Ademe. **L. C.**

L'envol des chauves-souris les a rendues résistantes aux virus

CHIROPTÉROLOGIE Une équipe internationale a identifié une mutation génétique qui expliquerait l'extraordinaire aptitude des chauves-souris à héberger une large variété de virus (Ebola, Marburg, nombreux coronavirus…) sans tomber malade. Avec d'autres facteurs génétiques, elle réduit le risque d'inflammation excessive en réponse à une infection virale. Or, cette mutation serait apparue chez le plus ancien ancêtre volant commun à ces mammifères en réponse à l'intense activité métabolique nécessaire au vol actif. **P. K.**

SOURCE : JUNJI ZHU, CLEVELAND CLINIC, ÉTATS-UNIS.

GREGORY GUIDA / BIOSPHOTO

Roussette noire endémique de l'île Maurice.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0325

Nos oreilles bougent pour mieux entendre

Dans certaines conditions extrêmes, le muscle auriculaire supérieur oriente par réflexe le pavillon de l'oreille vers une source sonore.

PLAINPICTURE

Deux muscles s'activent en présence de bruits parasites ou lorsque le son est émis dans notre dos.

Dans une certaine mesure, les humains ont encore la faculté de faire pivoter leurs oreilles à la façon d'un chien pour mieux percevoir les sons. Cette aptitude est héritée de nos lointains ancêtres qui, à l'instar des singes aujourd'hui, pouvaient orienter le pavillon de l'oreille vers une source sonore. C'est l'étonnante découverte faite par une équipe de l'université de la Sarre (Allemagne) qui a mis en évidence l'activité réflexe du muscle auriculaire supérieur (SAM) dans certaines conditions. Concrètement, 20 personnes ont été soumises à une expérience d'écoute de livres audio traitant de divers sujets. Mais à chaque écoute, les chercheurs diffusaient une ou plusieurs voix parasites en simultané à un volume croissant. Les participants étaient d'abord distraits par un enregistrement d'une voix masculine (condition facile). Puis un deuxième audio était ajouté avec une voix féminine (condition moyenne). Enfin, les deux distracteurs dépassaient en intensité celle du livre audio (condition difficile).

Des contractions captées par des électrodes

L'objectif était de simuler l'attention extrême que l'on accorde à une personne en train de nous parler dans un environnement bruyant. Si rien ne se passait en modes facile et moyen, les cinq électrodes placées autour des oreilles des participants ont enregistré des contractions musculaires inhabituelles en mode difficile. Celle du SAM, que les chercheurs interprètent comme un réflexe attentionnel.

Parmi les neuf musces encadrant nos oreilles, le muscle auriculaire postérieur (PAM) se contractait lui aussi. Non pas lorsque l'effort d'écoute augmentait, mais lorsque le son était diffusé dans le dos des sujets. « *Le PAM pourrait être plus sensible aux flux audio qui sont en dehors du champ de vision* », résume Andreas Schröer, coauteur de l'étude. Quant à savoir si ce système de réorientation de nos oreilles possède toujours une efficacité résiduelle, les chercheurs ne peuvent pas conclure. **C. G.**

12,9

MILLIARDS D'EUROS

L'impact financier annuel des particules fines en France

SANTÉ PUBLIQUE Selon un calcul inédit effectué par Santé publique France, la pollution aux particules fines mesurant moins de 2,5 micromètres (PM2,5) coûte environ 200 euros par an et par habitant. L'étude rappelle que plusieurs maladies ont un lien avéré avec l'exposition aux PM2,5 : cancer du poumon, BPCO, asthme, infections des voies respiratoires, infarctus ou hypertension artérielle. **S. R.-M.**

UMG/EVA MEYER-BESTING

Un pansement soigne le cœur

CARDIOLOGIE Un patch contenant des cellules cardiaques contractiles cultivées en laboratoire a été testé pour soigner des patients souffrant d'insuffisance cardiaque. Sur les 15 personnes ayant reçu le pansement, l'une d'elles a finalement bénéficié d'une transplantation, ce qui a permis d'examiner son cœur : les cellules du patch s'étaient intégrées aux tissus, sans effets secondaires. **H. J.**

SOURCE : AHMAD-FAWD JEBRAN, UNIVERSITÉ MÉDICALE DE GÖTTINGEN, ALLEMAGNE.

Des souris bipaternelles atteignent l'âge adulte

GÉNÉTIQUE Pour la première fois, des chercheurs ont pu donner naissance à des mammifères quasiment viables conçus à partir de l'ADN de deux mâles. Des souris, en l'occurrence, qui ont nécessité pas moins de 20 modifications génétiques des chromosomes pour pallier la non-complémentarité des deux caryotypes. Un cas unique d'androgenèse qui n'existe pas dans la nature. Avec pour objectif principal de comprendre les bases fondamentales de la reproduction. **C. G.**

ZHI-KUN LI ET AL.

11,8 % des rongeurs génétiquement modifiés étaient viables.

SOURCE : ZHI-KUN LI, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES.

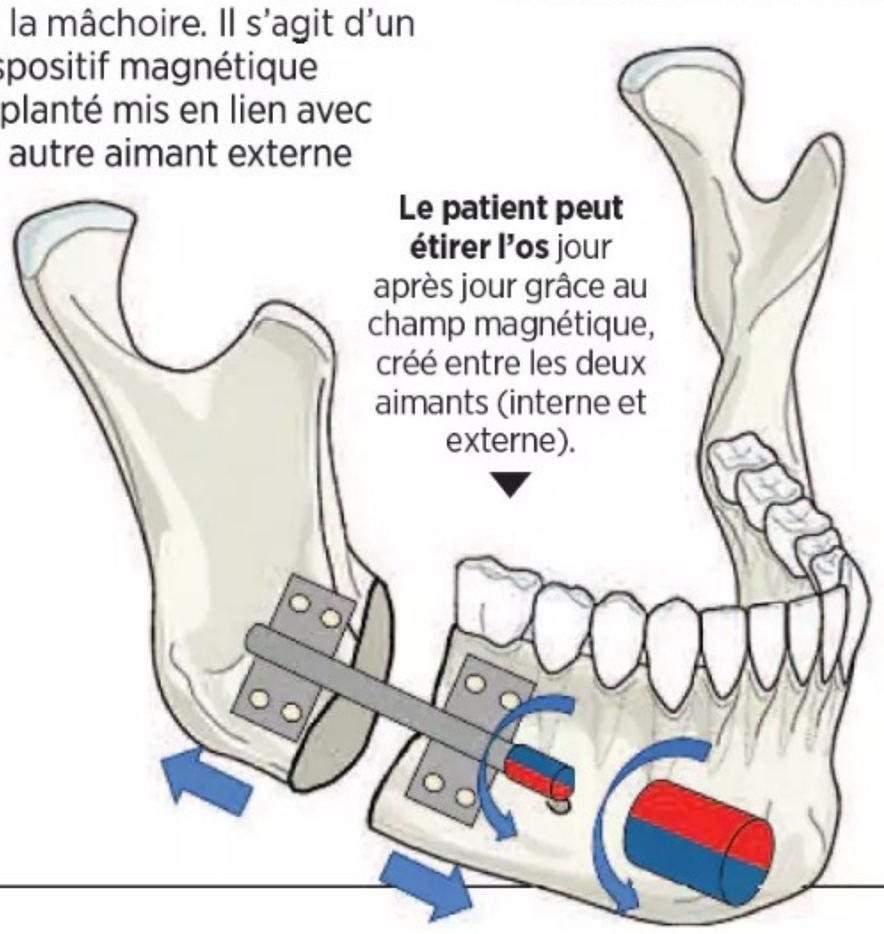
IL A DIT

« Guérir 80 % des malades du cancer à l'horizon 2040 est réaliste »

Pr Fabrice Barlesi, directeur de l'institut Gustave-Roussy à Villejuif, annonçant les objectifs du plus grand centre anticancer d'Europe. Il rappelle qu'aujourd'hui deux patients sur trois sont guéris, contre 50 % dans les années 1990.

Un aimant allonge la mâchoire

CHIRURGIE Révolution en chirurgie maxillo-faciale : le prix 2024 de la fondation des Gueules cassées vient d'être remis à la Pr Natacha Kadlub (hôpital Necker, Paris) et à Jean Boisson (Ensta, Paris) pour leur projet innovant, Dogmali, permettant d'allonger l'os de la mâchoire. Il s'agit d'un dispositif magnétique implanté mis en lien avec un autre aimant externe manipulé par le patient. De quoi faire avancer l'os d'un millimètre par jour sans intervention chirurgicale. Une alternative aux techniques actuelles, douloureuses et inconfortables, où des tiges externes métalliques doivent être manipulées. **S. R.-M.**



Le patient peut étirer l'os jour après jour grâce au champ magnétique, créé entre les deux aimants (interne et externe).

ENSTA

Reprogrammer les cellules tumorales, c'est possible

Des chercheurs ont réussi à convertir des cellules cancéreuses en cellules saines.

Cellule cancéreuse du gros intestin, vue au microscope électronique à balayage.

SPL/BSIP

Ramener les cellules cancéreuses dans le droit chemin. C'est la stratégie extrêmement novatrice que viennent de présenter des chercheurs de l'Institut supérieur coréen des sciences et technologies (Kaist) dans la revue *Advanced Science*. En effet, à l'origine, un cancer apparaît parce qu'une ou des erreurs génétiques interviennent lors de la division de cellules saines. Selon les mutations apparues, celles-ci se transforment en des sortes d'anarchistes biologiques qui prolifèrent jusqu'à former une tumeur. Ici, les chercheurs ont travaillé sur des cellules souches et intestinales pour identifier des maîtres régulateurs génétiques : de petits morceaux de code agissant comme des boutons de redémarrage. *In vitro*, puis *in vivo*, ils sont ainsi parvenus chez la souris à reprogrammer des cellules cancéreuses pour les convertir en cellules saines, reprenant une fonction cohérente avec les besoins de l'organisme.

Si les travaux sont très préliminaires, ils montrent que ces réversions pourraient être induites de façon systématique. Une façon inédite de guérir les cancers plutôt que de chercher à les détruire.

N. G. C.

Les chauffeurs de taxi moins victimes d'Alzheimer

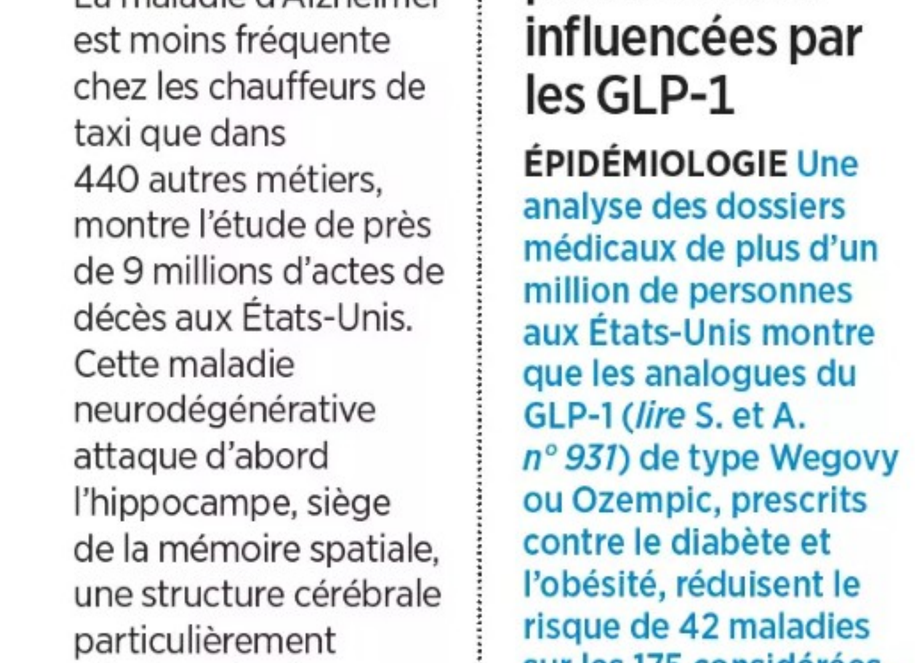
NEUROLOGIE La maladie d'Alzheimer est moins fréquente chez les chauffeurs de taxi que dans 440 autres métiers, montre l'étude de près de 9 millions d'actes de décès aux États-Unis. Cette maladie neurodégénérative attaque d'abord l'hippocampe, siège de la mémoire spatiale, une structure cérébrale particulièrement développée chez ces professionnels. **P. K.**

SOURCE : VISHAL PATEL, HARVARD MEDICAL SCHOOL, ÉTATS-UNIS.

42

Le nombre de maladies positivement influencées par les GLP-1

ÉPIDÉMIOLOGIE Une analyse des dossiers médicaux de plus d'un million de personnes aux États-Unis montre que les analogues du GLP-1 (*lire* S. et A. *n° 931*) de type Wegovy ou Ozempic, prescrits contre le diabète et l'obésité, réduisent le risque de 42 maladies sur les 175 considérées. Du moins lorsqu'ils sont utilisés pour des indications approuvées. **H. J.**



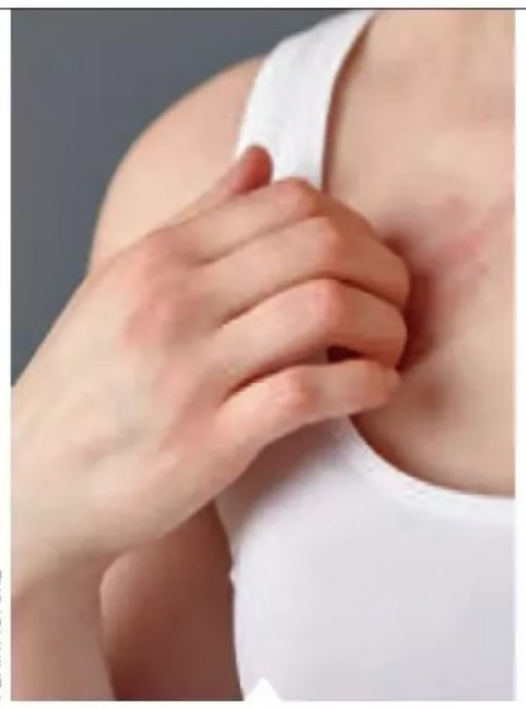
NORA EISEMANN ET AL.

La mammographie assistée par IA permet la détection de tumeurs invisibles à l'œil nu du radiologue (à droite).

L'IA améliore le dépistage du cancer du sein

ONCOLOGIE Une étude prospective nationale en Allemagne sur plus de 460 000 femmes confirme que l'analyse des mammographies par intelligence artificielle améliore le dépistage des cancers du sein. Assistés d'un algorithme de lecture des images, les radiologues réduisaient le taux de faux négatifs et de faux positifs tout en enregistrant un gain de temps considérable. Les experts estiment qu'une généralisation à tout le pays s'avère urgente. **P. K.**

SOURCE : NORA EISEMANN, UNIVERSITÉ DE LÜBECK, ALLEMAGNE.



PLAINPICTURE

La réduction des bactéries est un effet bénéfique du grattage.

Pourquoi on aime se gratter

DERMATOLOGIE Le geste a beau accentuer l'inflammation de la peau et retarder ainsi la guérison, le fait de se gratter procure généralement une sensation de plaisir. Un paradoxe évolutif qu'une équipe vient de percer à jour : si le grattage stimule excessivement les cellules immunitaires de la peau, il a aussi pour avantage de réduire la concentration de *Staphylococcus aureus*, la bactérie la plus courante impliquée dans les infections cutanées. **M. P.**

SOURCE : ANDREW LIU, UNIVERSITÉ DE PITTSBURGH, ÉTATS-UNIS.

Un hydrogel injectable contre l'ostéoporose

Composé de nanoparticules imitant les minéraux naturels de l'os, le ciment limiterait le risque de fracture.

Pour resolidifier rapidement les os des personnes souffrant d'ostéoporose, des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) ont mis au point une sorte de ciment osseux à injecter. Un hydrogel plus précisément, composé de nanoparticules d'acide hyaluronique et d'hydroxyapatite, conçus pour imiter les minéraux naturellement présents dans l'os. L'ostéoporose se caractérise en effet par une dégradation des structures osseuses internes, rendant plus sujets aux fractures les 4 millions de personnes qui en souffrent en France. Testé uniquement sur des rats pour l'instant, l'hydrogel a permis de tripler la densité osseuse au site d'injection. Celle-ci a même été multipliée par 4,8 lorsque l'injection était associée à des traitements classiques stimulant la formation osseuse et empêchant la résorption des os. Et ce, en moins d'un mois, alors qu'il faut habituellement un an environ aux traitements actuels pour densifier les os des patients, les laissant exposés au risque de fractures durant cette période. **L. M.**

FLOWBONE/EPFL LBO

Le produit, injecté directement dans l'os, vise à augmenter la densité osseuse des patients (illustration).

Bruits et sifflements d'oreille

Bourdonnement, tintement, sifflement… Ces bruits sont perçus dans l'oreille sans qu'aucun son n'existe réellement. Moralement et physiquement épuisants, ils peuvent véritablement gâcher la vie.

Acouphènes

Ils sont le plus souvent liés à une perte d'audition ou une mauvaise irrigation sanguine de l'oreille interne, mais leur origine peut aussi être mécanique (torticolis, bouchon de cérumen), traumatique (exposition à un son fort) ou encore psychique (le cerveau interprète mal les signaux du nerf auditif). Il est très difficile d'identifier la cause d'un acouphène, et donc de le soulager efficacement.

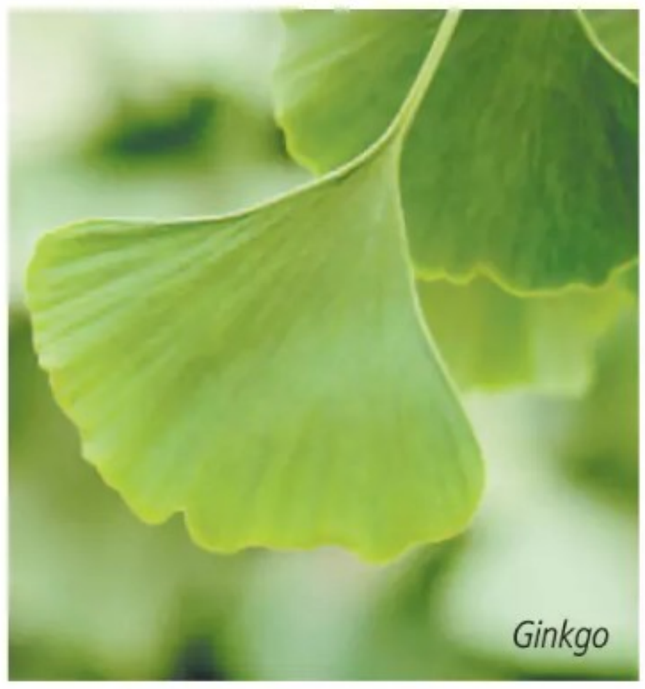
Vivre avec ses gênes auditives

Les générateurs de bruit blanc, la thérapie d'habituation ou encore l'ostéopathie peuvent aider à mieux supporter les gênes auditives, voire à les atténuer. Des produits de santé à base de plantes, tel que **tone**, apportent également une aide naturelle et saine.

Protéger son capital auditif

Développé il y a près de 15 ans par les laboratoires de recherche végétale danois New Nordic, **tone** est une formule naturelle pour préserver l'audition et lutter contre les bruits d'oreille.

tone contient des extraits de Galanga et de Myrtille fortement antioxydants, associés à du Ginkgo qui stimule la microcirculation sanguine et favorise une bonne audition.


Ginkgo

Chaque comprimé apporte aussi du Magnésium qui contribue à maintenir un bon équilibre électrolytique au sein de l'oreille, facilitant la transmission des signaux entre le nerf auditif et le cerveau, ainsi que de la Niacine qui participe au bon fonctionnement du système nerveux.

tone contient enfin de la Vitamine C pour diminuer la fatigue qui accompagne souvent les bruits et sifflements d'oreille.

tone est disponible en pharmacie et parapharmacie. Il est reconnaissable au logo en forme d'arbre argenté de New Nordic, gage de sa qualité supérieure et de sa naturalité.

Une invention suédoise

Sur la base des dernières avancées scientifiques, les laboratoires de recherche végétale New Nordic ont inventé **tone** : un comprimé aux ingrédients fortement concentrés (Sarrasin, Myrtilles, Galanga, Houblon, Vit. B3,C, Magnésium) et contenant en particulier du Ginkgo qui contribue au maintien d'une bonne audition.

Galanga

tone™
PRÉSERVER L'AUDITION

Disponible en pharmacie

tone 60,120+30 et 180 cp sous les codes **ACL 608 74 56, 632 21 14** et **601 67 94.**

Des conseils ?
Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 50 31 82** ou sur www.vitalco.com

TAPISSERIE DE BAYEUX XIE SIÈCLE ©BAYEUX MUSEUM

Détail de l'ouvrage du XIe siècle relatant la conquête de l'Angleterre par Guillaume le Conquérant (ici, le roi Harold festoie puis embarque pour la France).

La résidence royale de la tapisserie de Bayeux

Des archéologues ont confirmé l'emplacement dans le Sussex du château d'Harold, le dernier roi anglo-saxon d'Angleterre.

Une équipe d'archéologues des universités de Newcastle et d'Exeter (Royaume-Uni) assure avoir retrouvé l'endroit précis où était implanté, il y a près d'un millénaire, le centre du pouvoir d'Harold, le dernier roi anglo-saxon d'Angleterre, représenté à deux reprises sur la célèbre tapisserie de Bayeux. Long de près de 70 mètres, l'ouvrage brodé du XIe siècle raconte en une série de scènes continues les événements menant à la victoire normande. Ils ont pu confirmer l'existence des vestiges de deux bâtiments médiévaux sous une maison privée et son jardin dans le village de Bosham, dans le Sussex. Les fouilles de 2006 avaient en effet révélé une salle de bains anglo-saxonne, indiquant la présence d'une résidence d'élite antérieure à la conquête normande racontée par la tapisserie. Pour retrouver la résidence du roi Harold, les chercheurs ont réalisé une étude géophysique de la zone environnante ainsi qu'un examen minutieux des cartes, des archives et des rapports de fouilles déjà menées sur place en 2006.

Une trahison à l'origine de la guerre

Dans une première scène de la broderie, Harold prend ainsi part à un festin dans ce château de Bosham avant de s'embarquer pour la Normandie où il sera fait prisonnier par le comte Guy de Ponthieu. Il est ensuite libéré par Guillaume dit le Bâtard, duc de Normandie, à qui il prête serment et promet son soutien comme futur roi d'Angleterre après la mort du roi régnant, Édouard le Confesseur. Mais de retour à Bosham, Harold trahit sa parole : alors qu'Édouard vient de mourir, il monte lui-même sur le trône. S'ensuit une guerre menée par Guillaume à partir de septembre 1066, qui s'achèvera par la bataille de Hastings, à 85 kilomètres au sud de Londres, au cours de laquelle Harold est tué d'une flèche dans l'œil, dit la légende. Guillaume devient Guillaume le Conquérant. **M. B.**

1,95 MILLION D'ANNÉES

La plus ancienne trace d'homininés en Europe

ANTHROPOLOGIE L'arrivée des premiers individus du genre *Homo* sur le continent eurasiatique vient d'être reculée de 200 000 ans. Jusqu'ici, les plus anciennes traces de présence humaine hors Afrique dataient d'il y a 1,8 million d'années. Mais des os fossiles d'animaux trouvés sur le site de Grăunceanu (Roumanie) et portant des traces de découpe repoussent cette estimation. **M. B.**

La redoutable efficacité des « dents de sabre »

PALÉOBIOLOGIE Les très longues canines des smilodons n'étaient pas une aberration évolutive, comme cela a pu être envisagé. Elles faisaient de ces félidés à « dents de sabre », éteints il y a 10 000 ans environ, des chasseurs redoutables. En témoignent les expériences menées sur des répliques de canines imprimées en 3D soumises à quantité de tests mécaniques et simulations informatiques. Ces appendices étaient assez effilés pour perforer les chairs, tout en restant assez solides pour ne pas se briser sous la pression de la morsure. **H. R.**

SOURCE : TAHLIA POLLOCK, UNIVERSITÉ MONASH, AUSTRALIE.

STEVE MORTON

Sophia Boutique

la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

L'AFFAIRE DU MOIS

LA MONTRE *à mouvement* AUTOMATIQUE

VUILLEMIN REGNIER

Stock limité à
117 montres

~~199€~~
169€

- Balancier de 21600 alternances par heure
- Mouvement à remontage automatique par oscillation
- 180 pièces et 29 rubis
- Boîtier en alliage de métaux doré
- Bracelet en cuir
- Présentée dans son écrin gravé VUILLEMIN REGNIER
- Diamètre du cadran : 41 mm

Garantie 2 ans - Livraison : 2 semaines maximum

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
LA MONTRE AUTOMATIQUE	V210		**169€**	€
Frais d'envoi en Colissimo				**OFFERTS**
TOTAL DE MA COMMANDE				€

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de : **Sophia Boutique**

☐ Je règle par carte bancaire

N°

Expirant le

Signature obligatoire :

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

PSCA937

Stonehenge, symbole d'unité pour les peuples de l'île

L'origine diverse des pierres composant le site mégalithique suggère qu'il aurait été construit comme un monument d'unification à l'échelle de l'île britannique.

JON ARNOLD IMAGES/HEMIS.FR

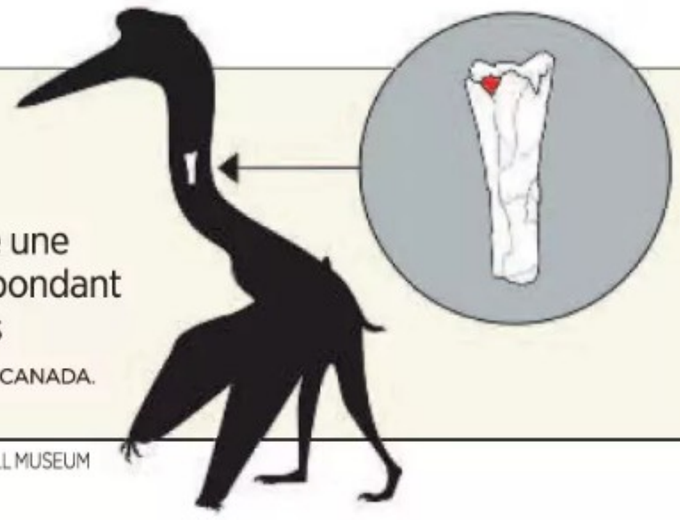
Les ensembles rocheux constituant le célèbre monument proviennent du pays de Galles, de l'Écosse et du sud de l'Angleterre.

« *Ni un temple, ni un calendrier, ni un observatoire* », c'est ainsi que Mike Parker Pearson balaie les différentes hypothèses émises sur la fonction première de l'un des plus célèbres monuments mégalithiques du monde. Selon ce professeur spécialisé en préhistoire britannique à l'Institut d'archéologie de l'University College de Londres, la disposition et les origines diverses et lointaines des différentes pierres composant Stonehenge, situé dans la plaine de Salisbury, dans le sud de l'Angleterre (Royaume-Uni), suggèrent que le site aurait été construit comme un lieu de rassemblement symbolique de l'union des peuples de Grande-Bretagne au néolithique et à l'âge du bronze. L'étude qu'il cosigne dans *Archeology International* s'appuie en effet sur des analyses ayant montré que 50 des 52 mégalithes ont été prélevés à 25 km, tandis que les *bluestones*, pierres plus petites, proviendraient du pays de Galles à 220 km et que la pierre d'autel principale de 6 tonnes aurait été transportée sur plus de 700 km depuis l'Écosse. **A. C.**

Le ptérosaure croqué par un crocodile

PALÉONTOLOGIE La vertèbre d'un jeune *Cryodrakon boreas*, un ptérosaure de 2 m d'envergure, révèle une morsure de crocodilien vieille de 76 millions d'années. L'os trouvé au Canada a une perforation correspondant à l'empreinte d'une dent. Une confirmation que les crocodiliens chassaient parfois les ptérosaures, des marques similaires ayant été observées en Roumanie. **J. I.**

SOURCE : CALEB BROWN, UNIVERSITÉ DE MANITOBA, CANADA.



ROYAL TYRELL MUSEUM

59 objets précieux, dont cette couronne, avaient été cachés durant la Seconde Guerre mondiale.

VILNIUS ARCHDIOCESE / ALISTE KARPYTĖ

Un trésor royal exhumé de la cathédrale de Vilnius

ARCHÉOLOGIE Anneaux en or, médaillons, sceptres, couronnes royales… 59 objets précieux cachés à la hâte au début de la Seconde Guerre mondiale ont finalement été retrouvés dans une niche murée de la cathédrale de Vilnius (Lituanie). Le trésor des Jagellon, dynastie de nobles lituaniens ayant régné sur la Pologne du XIVe au XVIe siècle lorsque les deux États étaient rattachés, était recherché depuis plus 30 ans. **S. de L.**

Une épée du VIe siècle émerge de terre

ARCHÉOLOGIE Une épée du VIe siècle a été mise au jour dans un cimetière anglo-saxon de la campagne du Kent, au Royaume-Uni. Avec sa garde en argent et en vermeil, couverte de motifs décoratifs complexes, et sa lame portant une écriture en caractères runiques, elle est déjà considérée par les archéologues comme l'une des plus remarquables du genre. **M. B.**

SOURCE : DUNCAN SAYER, UNIVERSITÉ DU LACASHIRE CENTRAL, ROYAUME-UNI.

Le mystère des squelettes assis

ANTHROPOLOGIE Treize individus — probablement gaulois — enterrés entre 300 et 200 avant notre ère ont été découverts dans le sous-sol du centre-ville de Dijon par les archéologues de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). Tous ont été inhumés d'une étrange façon : dans des fosses circulaires, en position assise, le dos contre la paroi et le regard dirigé vers l'ouest. Une cinquantaine de défunts ont déjà été exhumés ainsi sur une douzaine de sites de la moitié nord de la Gaule. Pourquoi une telle position ? Le mystère persiste. **M. B.**

C. FOUQUIN, INRAP

Probablement gaulois, les individus ont été inhumés dans des fosses circulaires au IIIe siècle avant J.-C.

66 MILLIONS D'ANNÉES

L'âge d'un vomi de poisson

PALÉONTOLOGIE C'est une découverte peu commune qu'a réalisée un chasseur de fossiles amateur sur les falaises de Stevns, au Danemark. Celle de restes d'un vomi de poisson datant du crétacé. Les analyses au musée du Sjaelland oriental, au sud de Copenhague, ont révélé qu'il se composait de morceaux de deux types de nénuphars différents, que les poissons avaient sans doute du mal à digérer... **H. J.**

J. LEE, THE NATIONAL MUSEUM OF DENMARK

614 disques gravés ont été enterrés rituellement au néolithique.

Des pierres sacrifiées pour le retour du Soleil

PALÉOCLIMATOLOGIE Mise au jour sur l'île danoise de Bornholm, 614 pierres gravées représentant le Soleil et datant d'il y a 4900 ans environ seraient à rapprocher d'une éruption volcanique majeure ayant obscurci le ciel et refroidi le climat à cette époque. C'est ce que suggère l'analyse conjointe de carottes de glace au Groenland et de sédiments au nord de l'Allemagne. Ces artefacts auraient ainsi été des sacrifices pour favoriser le retour du Soleil. **H. J.**

SOURCE : RUNE IVERSEN, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, DANEMARK.

AKG IMAGES

Boudicca (Ier siècle) fut reine des Icènes, un peuple de Grande-Bretagne.

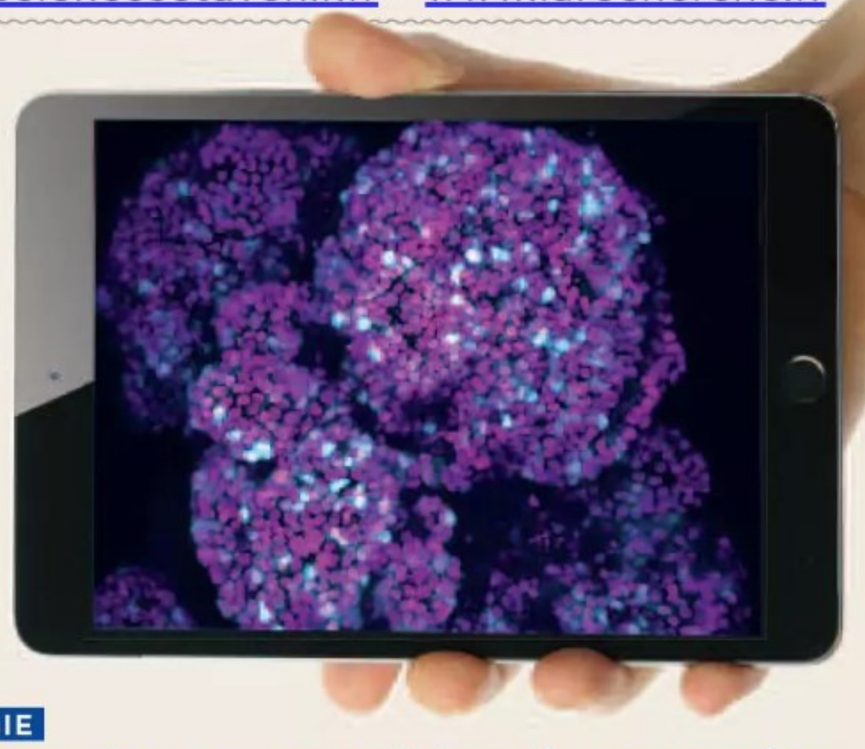
Les femmes régnaient sur ces tribus celtes

PALÉOGÉNÉTIQUE L'analyse d'ADN ancien prélevé dans des cimetières de l'âge du fer du sud de l'Angleterre (Royaume-Uni) confirme pour la première fois que certaines tribus étaient fondées sur des lignées féminines matrilocales : les femmes restaient dans leur village d'origine après leur mariage et héritaient des terres. Dans le Dorset, les chercheurs ont même identifié une parentèle de sept générations, issue d'une femme fondatrice et de ses quatre descendantes. **S. de L.**

SOURCE : LARA CASSIDY, UNIVERSITÉ DE DUBLIN, IRLANDE.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr



BIOLOGIE

Les premiers organoïdes de pancréas

Une équipe néerlandaise est parvenue pour la première fois à cultiver des organoïdes pancréatiques comportant les trois types cellulaires du pancréas humain. Cela ouvre des perspectives pour la modélisation des maladies touchant cet organe et le développement de traitements. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/41632XY

VIDÉO

On parle d'épigénétique sur Twitch

Discipline encore jeune mais déjà majeure, l'épigénétique était au menu du dernier direct de notre chaîne Twitch. Jonathan Weitzman, professeur à l'université Paris Cité, ainsi que Renaud Pourpre, docteur en patho-épigénétique, sont venus répondre à vos questions. sciav.fr/937epigen

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Pourquoi Santorin tremble

Depuis le 26 janvier, des milliers de secousses se succèdent dans l'archipel des Cyclades. Retour sur les causes du phénomène à l'origine d'un exode de la population. sciav.fr/937seism

5 minutes

La recette scientifique pour des œufs parfaits

Pour obtenir leurs textures optimales, jaunes et blancs d'œufs doivent être cuits séparément... sauf si vous utilisez la méthode conçue par des chercheurs en structure des matériaux. sciav.fr/937oeufs

10 minutes

La vie sur Terre n'a rien d'un hasard

Un nouveau modèle proposé par des géobiologistes conclut que notre existence sur Terre, loin d'être un hasard, est plutôt attendue et prévisible. sciav.fr/937vie

AMANDA ANDERSSON - ROLFE T AL. AFP, CAMILLE GAUBERT, NASA

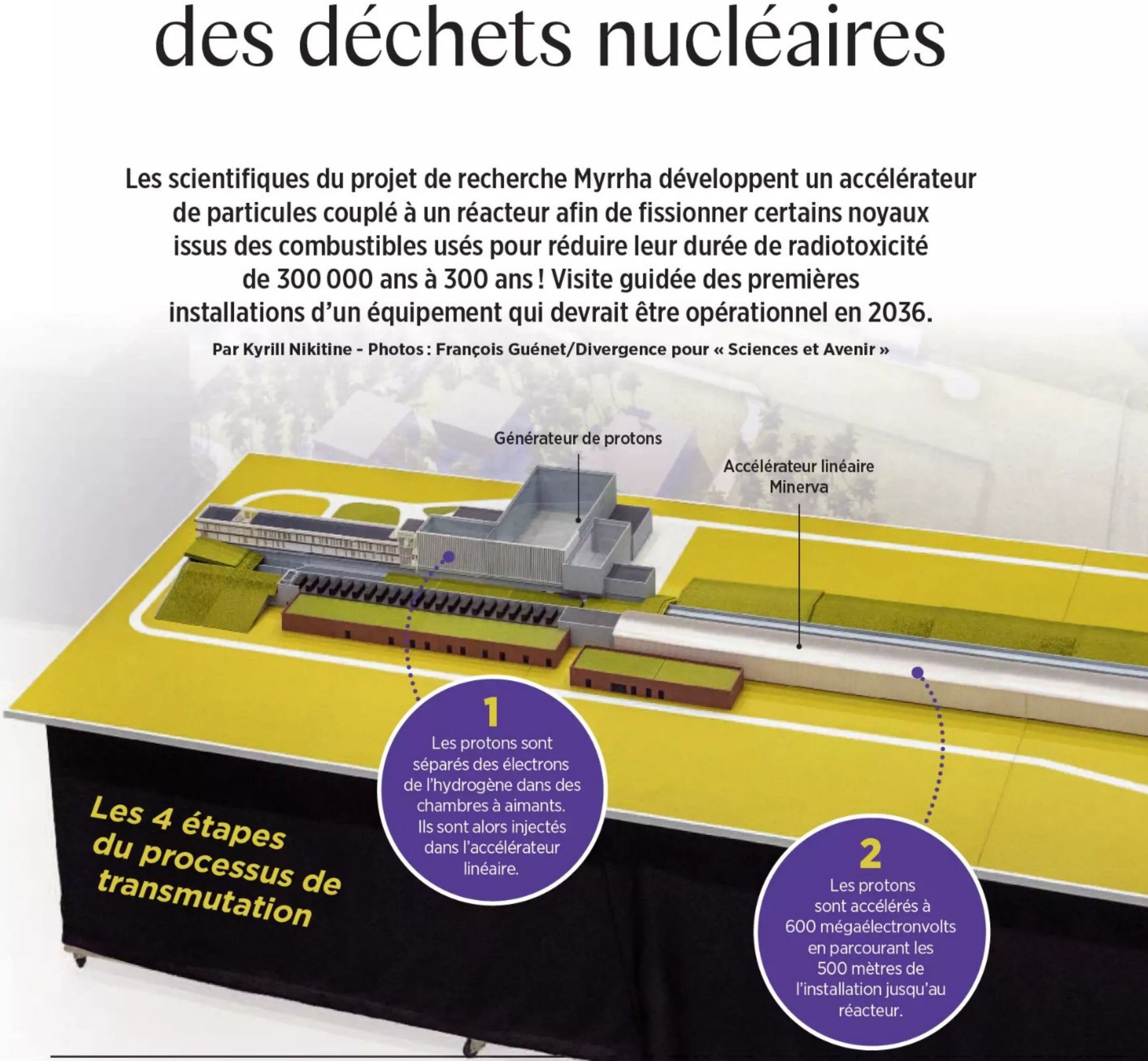
Vous êtes plus de 2 millions à nous suivre sur Facebook

Transmutation

Réduire la durée de vie des déchets nucléaires

Les scientifiques du projet de recherche Myrrha développent un accélérateur de particules couplé à un réacteur afin de fissionner certains noyaux issus des combustibles usés pour réduire leur durée de radiotoxicité de 300 000 ans à 300 ans ! Visite guidée des premières installations d'un équipement qui devrait être opérationnel en 2036.

Par Kyrill Nikitine - Photos : François Guénet/Divergence pour « Sciences et Avenir »

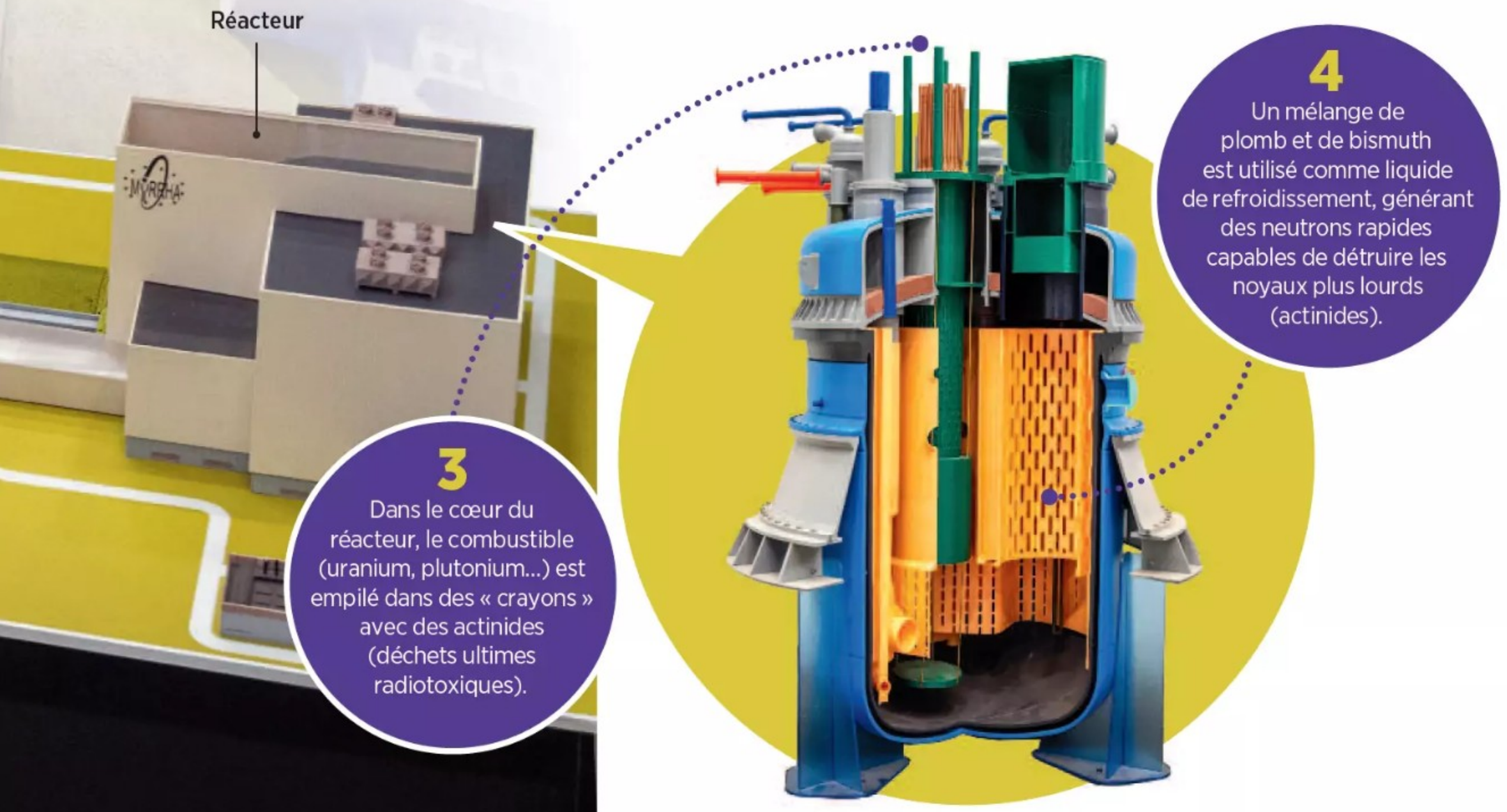


C'est l'alchimie du XXIe siècle : là où des savants du Moyen Âge rêvaient de transformer le plomb en or, des physiciens travaillent désormais à transformer les déchets nucléaires en des matériaux moins dangereux. Or, cette « transmutation » des temps modernes est devenue réalité à Mol, en Belgique. Comme on transforme un atome de plomb en un atome d'or en lui retirant trois protons, les scientifiques du projet de recherche nucléaire Myrrha (Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications) modifient la structure d'atomes hautement radioactifs grâce à un bombardement de noyaux avec des particules à haute énergie. À leur tête, le physicien Hamid Aït Abderrahim, qui a mis au point le procédé pour fissionner certains noyaux issus des combustibles usés afin de réduire leur radiotoxicité.

Les déchets des centrales nucléaires sont issus du combustible usé retiré des réacteurs actuels au bout de quatre ans et demi d'utilisation. Celui-ci est formé d'uranium 238 (93 %), d'uranium 235 (1 %), de plutonium (1 %) et de « déchets ultimes » (5 %) dont les plus radiotoxiques sont appelés « actinides mineurs ». Même s'ils ne constituent que 0,2 %, ils représentent près de 99 % de la radiotoxicité. L'américium, le neptunium ou bien encore le curium possèdent une période active radiotoxique de près de 300 000 ans. *« Notre système de transmutation permet de la réduire à seulement 300 ans ! »* s'enthousiasme Hamid Aït Abderrahim.

20 000
kilomètre par seconde
La vitesse des neutrons grâce au fluide caloporteur plomb-bismuth, contre 2 km par seconde avec de l'eau.

Entamé en 1998, ce projet colossal, estimé alors à environ 2 milliards d'euros (investis principalement par le gouvernement belge) et réunissant désormais des chercheurs du monde entier, devrait être opérationnel en 2036, selon les prévisions actuelles. Le gigantesque site, en plein chantier, a déjà accueilli un premier prototype Guinevere surnommé affectueusement « Baby Myrrha », dont les premiers tests sur des déchets ont été effectués avec succès dès 2010.



FISSION « Cassure » d'un noyau très lourd en deux noyaux de taille moyenne. Cette cassure peut être exercée sur certains atomes que l'on dit fissiles.

PÉRIODE RADIOACTIVE OU RADIOTOXIQUE Appelée également « demi-vie ». C'est le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs présents dans une quantité de matière se désintègrent.

TRANSMUTATION Dans le cadre du traitement des déchets radioactifs, c'est la transformation d'un noyau radioactif à vie longue en un autre noyau à vie beaucoup plus courte grâce à un bombardement de particules.

C'est au milieu d'un gigantesque terrain vague où travaillent encore les pelleteuses qu'Hamid Aït Abderrahim présente la première partie du site : *« Nous sommes en train de préparer l'installation de Minerva, un accélérateur de particules linéaire dont la construction et le test de son bon fonctionnement viennent de s'achever sur un autre site. »*

Des cavités radiofréquence pour accélérer les particules

Un gaz d'hydrogène sera d'abord irradié par des micro-ondes de lumière à basse fréquence, ce qui aura pour effet de séparer les électrons des protons contenus dans le gaz. Les seconds seront injectés dans cet accélérateur. Pour accélérer les particules, celui-ci sera doté de cavités radiofréquence : des enceintes métalliques qui abritent un champ électromagnétique. Au fur et à mesure de leur trajet, les protons les franchiront alors qu'elles oscilleront entre charge positive et charge négative. Les conducteurs exerceront ainsi alternativement une répulsion et une attraction sur les particules, ces différents champs magnétiques provoquant ainsi leur accélération.

Boîte d'assemblage des « crayons », contenant les combustibles ainsi que les actinides mineurs, qui seront placés dans le cœur du réacteur.

« Notre accélérateur, dont l'énergie monte à 600 mégaélectronvolts au bout des 500 mètres de cavités, sera connecté ensuite à un réacteur situé dans une seconde structure », décrit le physicien Adrian Fabich, directeur technique du projet Minerva. Là, seront empilées de petites pastilles de combustible (uranium, plutonium…) et d'actinides formant des « crayons ». Chacun contiendra environ 500 g de matière, constituant un total de 90 kg sur six assemblages. À terme, il sera possible d'insérer près de 45 % d'actinides dans un réacteur industriel prévu à cet effet.

Les neutrons vont rebondir comme dans un jeu de billard

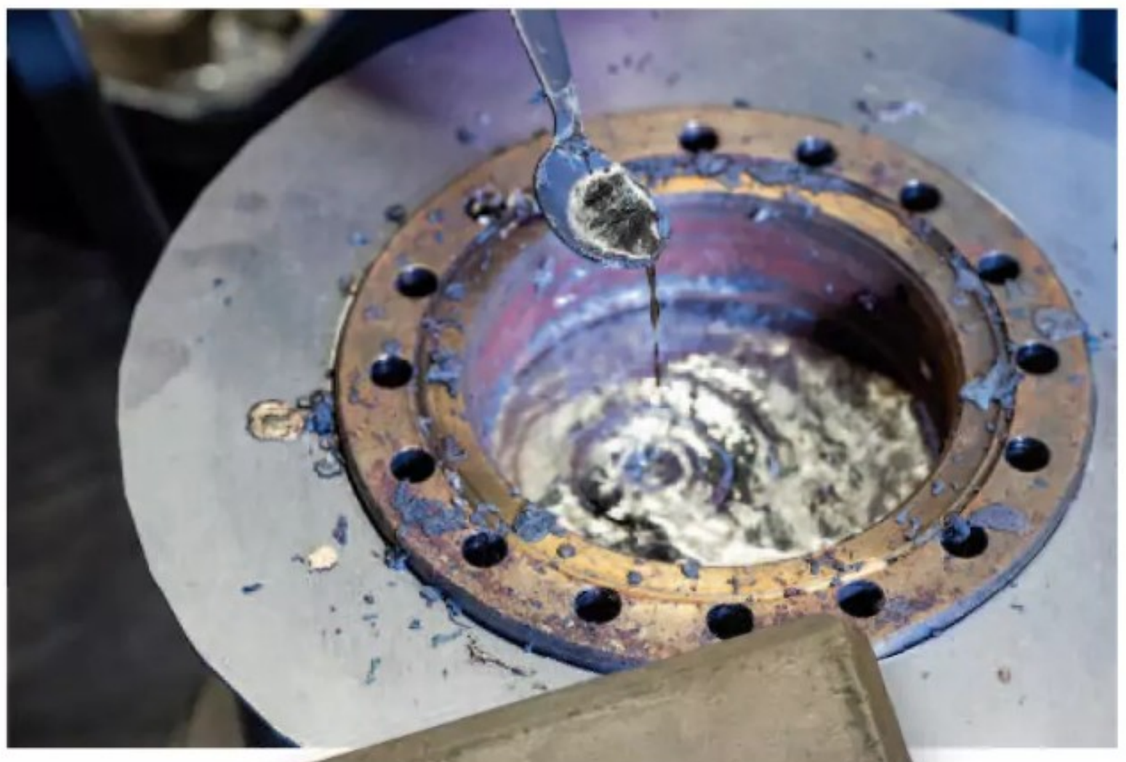
Tandis que les réacteurs classiques fonctionnent avec de l'eau pressurisée comme liquide de refroidissement, celui de Myrrha, dont la température dépasse les 300 °C, fonctionne avec un mélange de plomb (45 %) et de bismuth (55 %). Dans une des installations du gigantesque laboratoire réservées aux tests, Hamid Aït Abderrahim décrit la consistance de ce liquide très particulier : *« Ce mélange est essentiel pour la transmutation, car il permet à la fois de produire les neutrons primaires* [qui viendront amorcer la fission de la matière radioactive] *et de maintenir une réaction en chaîne à haute énergie dans le cœur du réacteur. De plus, ses propriétés chimiques permettent d'éviter les risques de corrosion à long terme, car, une fois intégré au réacteur, il sera maintenu en circuit fermé pendant quarante à cinquante ans. »*

Ce changement de fluide permet de travailler avec ce que les physiciens appellent des « neutrons rapides ». Une solution à laquelle la France s'était intéressée avec le réacteur Phénix, définitivement arrêté en 2009. Joël Guidez, qui le dirigeait, explique les enjeux : *« Lorsque l'on utilise de l'eau comme fluide caloporteur, ses atomes d'hydrogène, du fait de leur légèreté, absorbent*

TECHNOLOGIE

L'Inde se met au thorium

Le gouvernement indien vient d'achever en 2024 son premier prototype de réacteur surgénérateur à neutrons rapides à Kokkilamedu, dans l'État du Tamil Nadu. Ce réacteur refroidi au sodium reposera sur l'utilisation de thorium 232, dont le minerai est beaucoup plus abondant que les gisements d'uranium et dont l'Inde possède un quart des réserves mondiales. Par transmutation, le thorium produira *in fine* de l'uranium 233, un combustible fissile. Il pourra ainsi générer plus de matière fissile qu'il n'en consomme. La production d'actinides mineurs pourrait être environ quatre fois plus faible que celle d'un réacteur à eau pressurisée. Avec un volume passant de plusieurs tonnes à quelques kilogrammes seulement.



Une cuve du réacteur à échelle 1/6 et des « échangeurs de chaleur » servent à tester la régulation de température du plomb-bismuth.

Un mélange plomb-bismuth (ci-dessus en barre) est utilisé comme liquide de refroidissement, ou fluide caloporteur, intégré en circuit fermé dans le réacteur (en haut).

les neutrons et leur font perdre de l'énergie en les ralentissant. » Dans ce cas, les neutrons sont dits lents. Leur vitesse est de l'ordre de 2 km/s, ce qui correspond à une énergie cinétique d'environ 0,025 électronvolt. « *Le sodium ou le plomb-bismuth possèdent, quant à eux, des atomes beaucoup plus lourds,* poursuit le physicien français. *Les neutrons vont donc rebondir comme dans un jeu de billard et conserver leur élan jusqu'aux atomes du combustible.* » La vitesse des neutrons peut alors atteindre les 20 000 km/s, avec une énergie cinétique minimale de 1 mégaélectronvolt!

C'est ici qu'intervient la phase finale de la transmutation. Ces neutrons rapides sont capables de détruire des noyaux plus lourds que ceux de l'uranium comme ceux des actinides mineurs en les fissionnant. En effet, en fonction de l'énergie des neutrons, ils s'agglomèrent au noyau ciblé et en modifient la structure. « *Prenons le cas d'un noyau d'américium 241,* explique Hamid Aït Abderrahim. *Si le neutron est "lent", l'américium 241 se transforme en américium 242 après avoir capturé ce neutron, son isotope plus lourd. S'il reste suffisamment "en vie", il peut par la suite capturer un deuxième neutron et se transformer alors en américium 243. Par contre, si le neutron est "rapide", le noyau d'américium 241 est directement cassé en deux pour donner deux noyaux. On obtient ainsi les "produits de fission" qui, eux, sont beaucoup moins radiotoxiques.* »

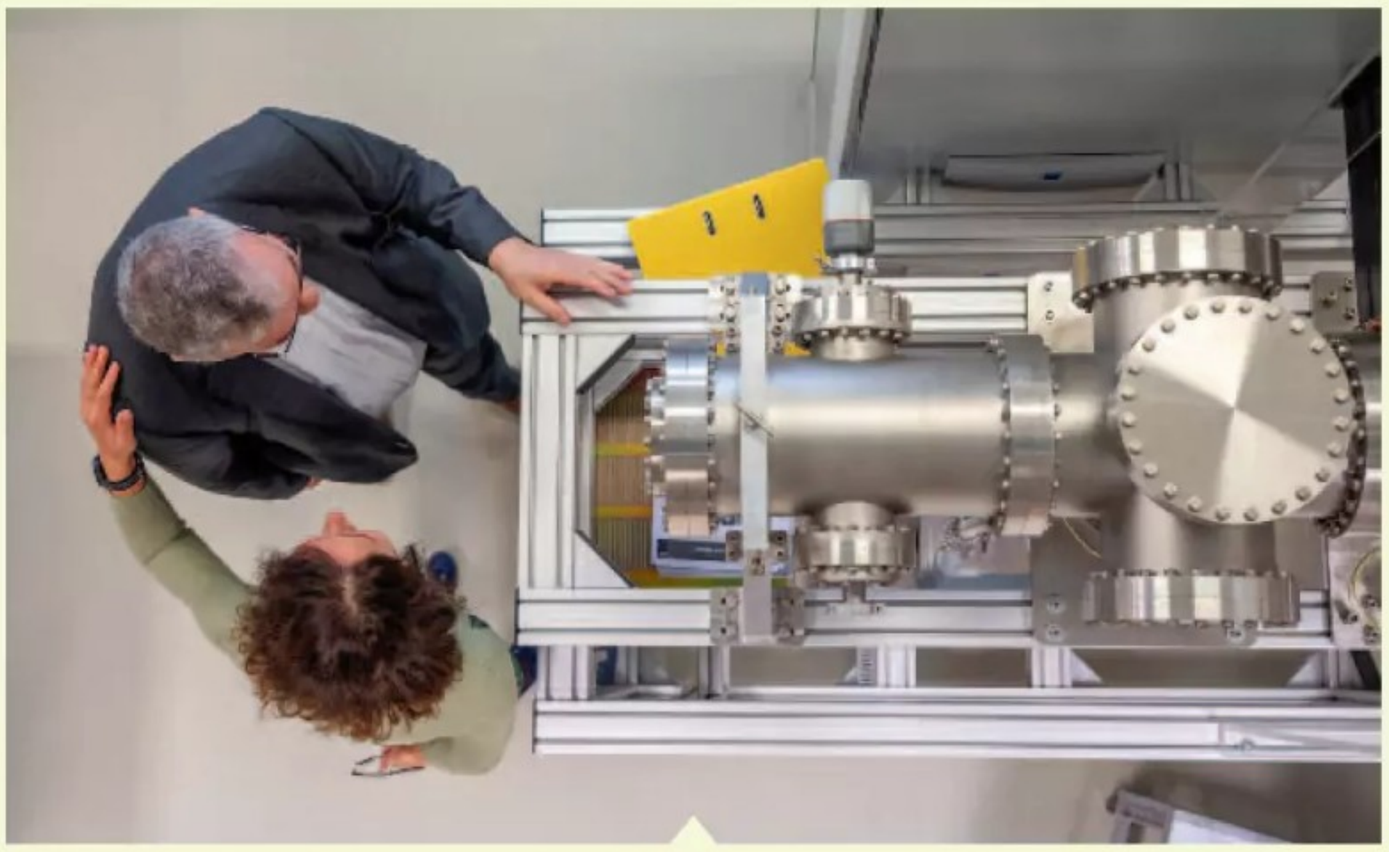
Faire fonctionner un tel réacteur n'est pas sans danger. Rappelons que l'uranium naturel ne contient que 0,7 % de matière fissile (de l'uranium 235)

« Dans le cœur du réacteur, il n'y a pas assez de matière fissile pour maintenir la réaction en chaîne par elle-même »

Hamid Aït Abderrahim, directeur du projet Myrrha

APPLICATION

Des débouchés en médecine nucléaire



Des radio-isotopes thérapeutiques plus performants vont être développés grâce à l'accélérateur de particules du projet Myrrha (ici un circuit électromagnétique).

Le projet Myrrha est également un centre de recherche dédié à la médecine nucléaire, notamment pour le développement de nouveaux traitements contre le cancer. En utilisant le même accélérateur de particules, les protons sont projetés sur une petite cible de métal et créent un nuage de différents atomes. Ceux-ci sont ensuite débarrassés d'un certain nombre d'électrons à l'aide d'un laser, ce qui permet d'obtenir des radio-isotopes comme l'actinium 225 ou le terbium 161. Ce sont précisément ces radio-isotopes, émettant un rayonnement d'une très forte intensité, qui permettent de détruire les cellules cancéreuses. Pour les conduire auprès de celles-ci, on fait appel à une molécule dite porteuse. Elles se fixent à des protéines spécifiques que ces cellules arborent à leur surface en plus grand nombre que les cellules saines. Ainsi, la majorité de ces dernières sont préservées et les effets secondaires pour les patients sont considérablement réduits.

pour 99,3 % de matière non fissile (uranium 238). Les atomes d'uranium 238 sont dits fertiles car ils peuvent devenir fissiles : en absorbant un neutron « rapide », ils se transforment en plutonium 239. Il est donc ainsi possible de produire davantage de noyaux fissiles qu'il n'en est consommé, c'est la « surgénération ». Elle permet de brûler le combustible jusqu'à 96 % ! « *C'est là que tout se corse !* avertit le physicien belge. *Une telle puissance doit être maîtrisée, sinon on risque l'accident par emballement. Pour pallier ce risque, notre réacteur est dit sous-critique.* » Sous-critique ? « *Dans un réacteur classique dit critique, la réaction en chaîne est auto-entretenue, c'est-à-dire que chaque neutron consommé pour faire une fission est remplacé par un autre, issu de la fission,* explique Annick Billebaud, chercheuse au CNRS. *Dans un système "sous-critique", on consomme plus de neutrons que l'on en produit, la réaction en chaîne s'arrête très vite. Donc pour fonctionner, un tel réacteur doit être alimenté en permanence en neutrons supplémentaires. Un cœur est calculé pour être critique ou sous-critique en jouant sur le type et la quantité de noyaux en présence dans les assemblages combustible-actinides et leur géométrie.* » Et dans le cœur de Myrrha, « *la matière fissile n'est pas suffisante pour maintenir la réaction en chaîne par elle-même : elle n'est pas auto-entretenue* », confirme Hamid Aït Abderrahim. En effet, au bout de dix réactions en chaînes, soit un millionième de seconde, le processus s'arrête.

Myrrha permettra ainsi de brûler l'uranium et le plutonium présents dans les crayons, mais aussi les actinides mineurs, au bout de dix cycles de combustion. Or pour ces éléments, il n'existe à l'heure actuelle aucun moyen de les extraire des déchets nucléaires. Mélangés à du verre en fusion porté à 1100 °C, ils sont vitrifiés pour l'éternité.

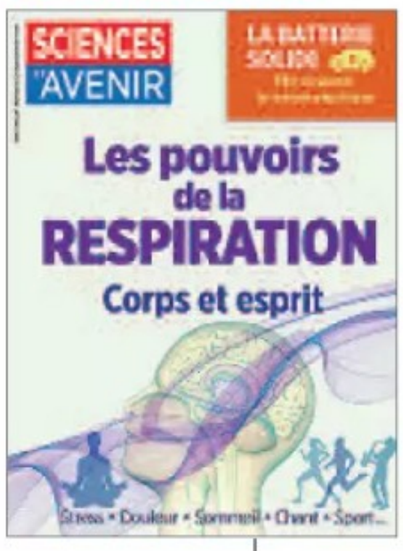
15 machines nécessaires pour le parc nucléaire européen

Mais pour s'attaquer à tous les actinides générés par les pays européens qui veulent sortir du nucléaire, il faudra plus d'un Myrrha. Les équipes de Sylvain David, chercheur à l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules du CNRS, ont fait le calcul pour le seul parc nucléaire français : environ une tonne d'actinides est produite par nos réacteurs chaque année. « *Il faudrait un peu moins de quarante ans pour brûler tous ces actinides, ce qui nécessiterait 15 machines industrielles de type Myrrha, d'une puissance totale de 6000 mégawatts* », avertit Hamid Aït Abderrahim. Le prix de l'alternative à l'enfouissement. ■

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL



LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !	plus de 160 000 followers	plus de 163 000 instagrammeurs	Plus de 7 000 abonnés professionnels	plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Le laser, une révolution pour communiquer avec l'espace

En transmettant des volumes de données beaucoup plus importants que les ondes radio, cette technologie optique marque une avancée majeure dans les communications spatiales. Restent des défis techniques à surmonter.

NASA/C&E/O. HODASAVA

La vidéo, en ultra-haute définition, dure une vingtaine de secondes. Elle met en scène le chat surnommé « Patate » d'un employé de la Nasa pourchassant la tache rouge d'un pointeur laser, avec en surimpression une panoplie de graphiques indiquant la trajectoire de la sonde américaine Psyché, partie en 2023 pour rejoindre et étudier un astéroïde de fer au-delà de l'orbite de Mars (*lire* S. et A. *n° 919*) — une première dans l'exploration spatiale. Ce petit film ainsi que d'autres contenus numérisés, telles des photographies d'art ou de paysages terrestres, ont été transmis depuis plus d'un an par Psyché à mesure que le vaisseau s'éloignait de notre planète. Car la Nasa l'a investi d'une autre mission, encore plus capitale : démontrer la faisabilité d'une technologie qui pourrait révolutionner dans les années à venir les communications dans l'espace !

Alors que les engins spatiaux utilisaient jusqu'à présent les ondes radio pour transmettre des informations, le démonstrateur embarqué dans Psyché — dénommé Deep space optical communications (DSOC) — exploite des instruments d'optique, en particulier des lasers. « *Cette technologie accroît d'un facteur 10 à 100 les débits de données par rapport aux radiofréquences* », précise l'ingénieur de la Nasa Abhijit Biswas, un des responsables du projet. Et grâce au dispositif DSOC, l'agence spatiale américaine l'a expérimentée pour la première fois dans l'espace lointain : jusqu'à 495 millions de kilomètres de la Terre en décembre 2024, mille fois plus que le précédent record ! « *Les systèmes optiques transformeront profondément les capacités de communications des missions d'exploration du Système solaire,* assure Abhijit Biswas. *Au niveau scientifique, en transmettant beaucoup plus de mesures, d'images complexes et même des vidéos en haute résolution issues des orbiteurs, rovers et autres engins robotisés, mais aussi pour les futurs vols habités à destination de Mars et les communications quotidiennes des astronautes.* »

Exploitées depuis les débuts de l'ère spatiale, les liaisons radio rencontrent actuellement plusieurs limitations. En raison d'un très grand nombre d'utilisateurs (radiophonie, télévision, trafic aérien, satellites militaires, etc.), ce spectre d'ondes électromagnétiques est tout d'abord extrêmement chargé. Les intervalles de fréquences allouées aux

L'expérience DSOC de la Nasa, embarquée dans la sonde Psyché, a transmis par laser des informations à la Terre à une distance record de 495 millions de kilomètres en décembre dernier (illustration).

missions interplanétaires — dans les bandes dites X ou Ka — sont, de surcroît, relativement étroits : *« quelques dizaines ou centaines de mégahertz tout au plus »*, explique Géraldine Artaud, ingénieure au Centre national d'études spatiales de Toulouse. Des bandes passantes aussi limitées restreignent ainsi la quantité d'informations pouvant être transférée par unité de temps, alors que les instruments embarqués dans les sondes (caméras, radars, spectromètres, etc.), de plus en plus perfectionnés, produisent des volumes de données toujours plus importants.

La longueur d'onde des signaux radio — typiquement autour de 3 centimètres — pose également des difficultés. Car le diamètre d'un faisceau d'ondes électromagnétiques est proportionnel à la distance entre l'émetteur et le récepteur, mais aussi à la longueur d'onde. Un faisceau transmis depuis Mars mesure ainsi plusieurs rayons terrestres de large en arrivant sur notre planète ! *« Une grande partie de la puissance initiale est perdue et le signal d'autant plus affaibli »*, pose Géraldine Artaud. De gigantesques antennes paraboliques sont par conséquent nécessaires pour récupérer suffisamment de données, à l'instar des récepteurs du Deep Space Network de la Nasa situés aux États-Unis, en Espagne et en Australie, qui mesurent jusqu'à 70 mètres de large — une taille qu'il devient difficile de dépasser.

Détrôner les ondes radio pour la cartographie de Mars

Et même avec de telles infrastructures, les débits restent faibles, surtout pour les destinations lointaines. En 2019, lorsque New Horizons a survolé l'astéroïde Arrokoth, l'objet céleste le plus éloigné jamais observé par un appareil humain, à près de 7 milliards de kilomètres de la Terre par-delà l'orbite de Pluton, les données n'arrivaient qu'au compte-gouttes au rythme de 1 kilobit par seconde (kbit/s). Depuis la planète Rouge, c'est Mars Reconnaissance Orbiter, dont la mission principale est de cartographier notre voisine, qui bénéficie des débits les plus élevés grâce à son antenne de 3 mètres de diamètre. Ils n'atteignent toutefois que 6 mégabits/s quand la Terre et Mars sont au plus proche (55 millions de kilomètres) et 500 kbits/s au maximum de l'éloignement (401 millions de kilomètres). Des flux aussi réduits génèrent alors des goulets d'étranglement : *« Les scientifiques ne peuvent rapatrier toutes les données qu'ils souhaitent,* souligne Géraldine Artaud. *Ils sont obligés de choisir. »* Malgré des décennies d'observation, la cartographie de Mars à la résolution maximale n'a pu être réalisée ainsi que pour une faible proportion de sa surface.

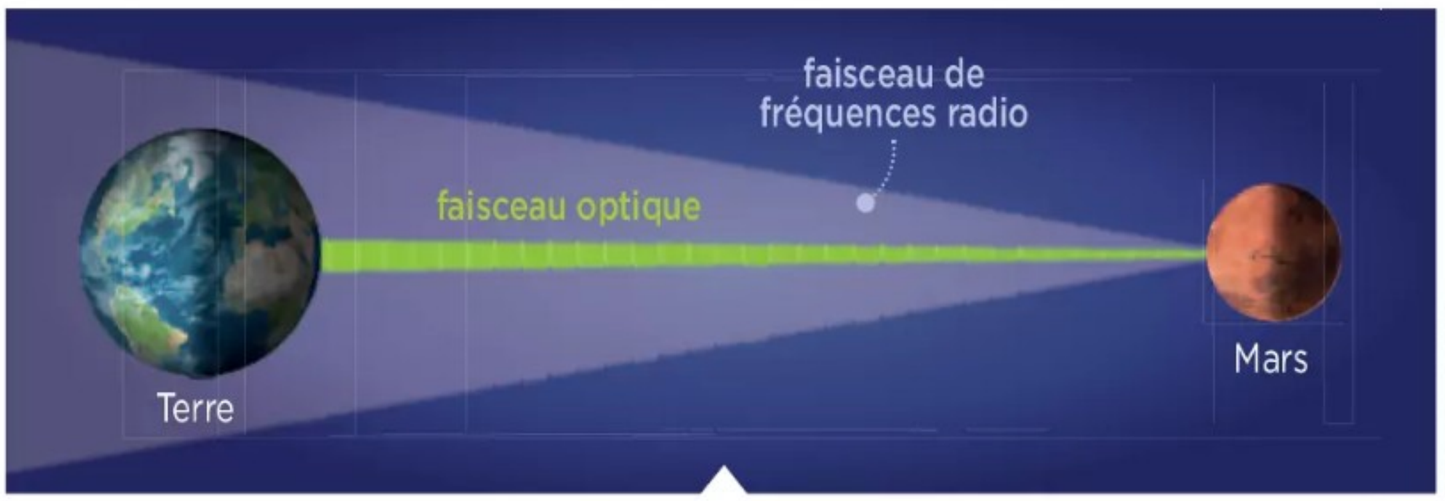
D'où l'idée de remplacer les ondes radio par la lumière laser, dans le proche infrarouge notamment. Ces rayonnements monochromatiques procurent en effet d'indéniables avantages. À commencer par des plages de fréquences non

GÉRALDINE ARTAUD

« Cette technologie pourrait changer radicalement la donne et se généraliser probablement d'ici à une dizaine d'années »

Géraldine Artaud, ingénieure au Cnes de Toulouse

encombrées et surtout bien plus élevées pour encoder les informations, avec des bandes passantes gigantesques de l'ordre du térahertz (mille milliards de hertz). La largeur du « tuyau » permettant de transmettre des données est *« incomparablement plus grande que pour les radiofréquences »*, insiste Géraldine Artaud. Et comme les longueurs d'onde sont plus petites — autour de 1 micromètre —, les signaux divergent mille fois moins que les ondes radio. Un faisceau laser émis depuis Mars ne mesurerait ainsi que quelques pourcents du rayon terrestre en nous parvenant, *« ce qui permettrait de réduire la puissance, la taille et donc le coût des équipements de télécommunications »*, poursuit l'ingénieure.



Un faisceau laser émis depuis Mars, d'une amplitude bien moindre que celle des fréquences radio, permettrait de réduire la taille et le coût des télécommunications.

Une précision angulaire extrêmement fine

Plusieurs défis techniques doivent toutefois être surmontés. Ils concernent en premier lieu la transparence de l'atmosphère, car les liaisons optiques sont beaucoup plus sensibles aux perturbations atmosphériques que les ondes radio *(lire l'encadré ci-dessous)*. Au sol, il faut en outre pouvoir récupérer des signaux fortement atténués par leur long voyage dans l'espace, en détectant parfois des quantités extrêmement faibles de particules lumineuses (photons). Enfin, du fait de l'étroitesse du faisceau laser, un pointage très fin doit être réalisé avec des engins lointains se déplaçant à très grande vitesse : une précision angulaire de l'ordre du millionième de radian pour les distances martiennes par exemple, sans quoi le laser ratera sa cible et la communication sera perdue.

Réalisées principalement par la Nasa, les expérimentations se sont multipliées depuis le début des années 2010. Elles ont permis d'établir des liaisons optiques avec la Station spatiale internationale, des satellites en orbites basse et géostationnaire et au plus loin avec la sonde lunaire Ladee, à 350 000 km de la Terre. L'expérience DSOC pulvérise ainsi tous les records de distance ! *« Les technologies mises en œuvre sur Terre et dans l'espace fonctionnent à merveille »*, se réjouit Abhijit Biswas. Au sol, l'observatoire de Table Mountain en Californie (États-Unis) fait office de station de liaison « montante ». Il transmet dans la direction de Psyché un faisceau laser de 7 kilowatts d'une longueur d'onde de 1,06 micromètre : un peu divergent pour illuminer plus facilement la sonde et servir en quelque sorte de balise, afin que DSOC la reconnaisse puis dirige vers la Terre son petit télescope avec une grande précision. Celui-ci émet alors un laser de 4 watts moins divergent (1,55 micromètre) contenant les informations à transmettre, telle la vidéo du chat Patate. Cette liaison « descendante » est réceptionnée finalement à l'observatoire du Mont Palomar par un télescope de 5 mètres de diamètre, lui aussi en Californie, qui utilise des matériaux supraconducteurs pour détecter les photons un à un.

En décembre 2023, alors que Psyché se trouvait à 53 millions de kilomètres de la Terre (la distance minimale avec Mars), le flux s'élevait ainsi à 267 mégabits par seconde (Mbits/s) — comparable à une connexion internet haut débit ! Comme les scientifiques pouvaient s'y attendre, il s'est réduit ensuite de façon exponentielle avec la distance. Mais en juin 2024, à 390 millions de kilomètres de la Terre, le débit atteignait encore 8,3 Mbits/s — 20 fois plus qu'avec les ondes radio. Alors que les tests devraient se poursuivre jusqu'en août 2025, *« ces résultats dépassent déjà toutes nos attentes et marquent une étape clé pour les communications laser dans l'espace »*, se félicite Abhijit Biswas. *« Ces démonstrations sont très impressionnantes,* abonde aussi Géraldine Artaud. *Elles montrent que cette technologie pourrait changer radicalement la donne et se généraliser probablement d'ici à une dizaine d'années. »* ■

Franck Daninos

PERTURBATIONS ATMOSPHÉRIQUES

Le laser peine à franchir les nuages

Contrairement aux ondes radio, les communications par laser sont très sensibles aux perturbations atmosphériques : nuages, brouillard, turbulences, etc. *« C'est la principale limitation de cette technologie pour transmettre des données entre la Terre et l'espace »*, relève l'ingénieure Géraldine Artaud. Les longueurs d'onde des lasers — autour du micromètre — interagissent en effet avec les éléments de taille équivalente, comme les aérosols et autres particules présentes dans les nuages. Si ceux-ci sont trop épais, le signal sera ainsi complètement éteint. Plusieurs solutions sont à l'étude, comme des systèmes de communication hybride (radio/optique) exploitant des satellites-relais, des récepteurs installés dans des régions à faible nébulosité ou très haute altitude, mais surtout la mise en place d'un réseau de stations actionnables selon la météorologie.

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Un evenement exclusif

Les Îles Caraïbes

À L'OMBRE DU PARADIS ?

Un héritage colonial complexe
Une terre d'échanges fragile
Climat : le défi face aux ouragans

Les noms des Caraïbes, des Antilles et des Îles Vierges évoquent des images de plages de sable blanc, de mers turquoise, de paysages volcaniques verdoyants et de musiques envoûtantes.

Ces régions sont également imprégnées d'histoires et de légendes anciennes, comme celle de Sainte-Ursule et des onze mille vierges, qui ont donné leur nom à l'archipel des Îles Vierges.

La croisière inclura une visite à Saint-Domingue, capitale de la République dominicaine sur l'île d'Hispaniola, où se trouve l'un des meilleurs musées d'archéologie sous-marine de la région.

À bord, des conférences seront animées par des experts tels que l'historien **Jean-Sébastien Guibert** et le spécialiste du climat **Jeremy Lepesqueur**, qui aborderont des sujets tels que l'histoire antillaise, l'intensification possible des cyclones et leurs effets sur l'agriculture et la santé des populations... Vous offrant une occasion unique d'approfondir vos connaissances sur les Antilles, tant sur terre que sur mer.

Cette expérience promet d'être enrichissante et captivante, invitant les voyageurs à rêver et à découvrir les multiples facettes de ces îles.

Dominique LEGLU

LES POINTS FORTS

- UN VOYAGE TOUT INCLUS À BORD DU COSTA FASCINOZA 5*
- VOLS ALLER-RETOUR AU DÉPART DE PARIS
- PENSION COMPLÈTE ET BOISSONS INCLUSES À VOLONTÉ À BORD DU BATEAU
- ACCOMPAGNEMENT, ANIMATIONS ET CONFÉRENCES EXCLUSIVES AVEC NOS CONFÉRENCIERS

Graph. Atelier Vecteur M (26) - Photo plage : Azzedine Rouichi Unsplash

VOS CONFÉRENCIERS À BORD ! (2)

Dr Dominique Leglu, Ancienne directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche.

Jean-Sébastien Guibert, Maître de conférences en histoire et archéologie maritime à l'université des Antilles. .

Jeremy Lepesqueur, Ingénieur d'études et recherches sur les impacts sectoriels du changement climatique, Météo-France.

À BORD DU COSTA FASCINOZA 5*
DU 11 AU 19 DÉCEMBRE 2025
A PARTIR DE **1 990 € / PERS.** (1)
En occupation double en cabine intérieure au départ de Paris

MYCOMM Experiences

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-caraibes.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | experiences@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

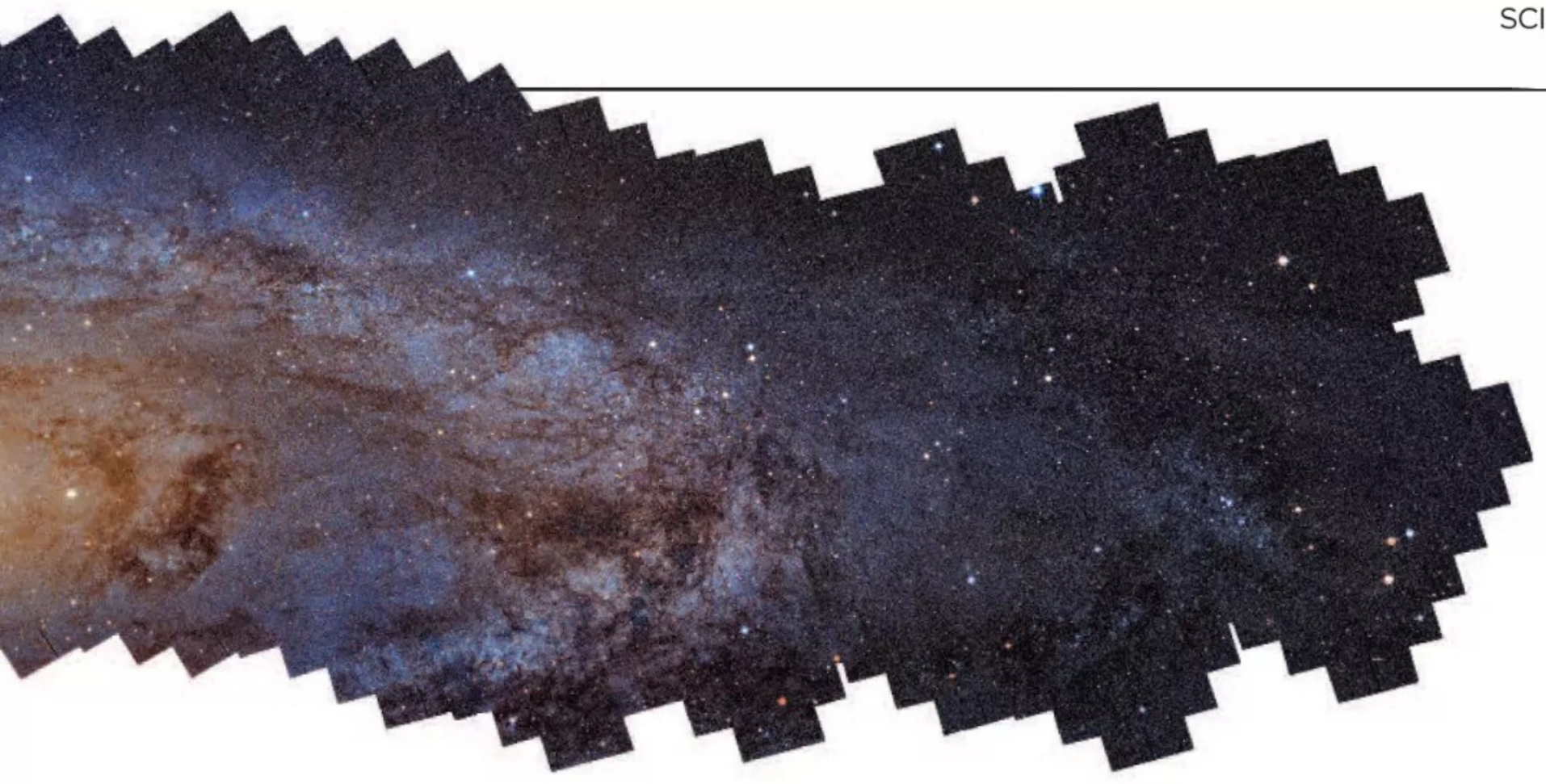
La galaxie d'Andromède contiendrait moins de matière noire que prévu

Une nouvelle étude remet en cause les estimations de la masse de la galaxie d'Andromède, la réduisant de moitié, voire d'un facteur quatre. Ce résultat pourrait avoir des implications majeures sur notre compréhension de la répartition de la matière noire dans l'Univers.

Et si les astrophysiciens avaient abusé de la matière noire, cette composante de l'Univers dont on ignore la nature, mais qui représente 27 % de sa composition totale ? C'est en tout cas une idée qui fait son chemin : les mouvements de galaxies pourraient s'expliquer avec beaucoup moins de matière noire que ce qui était jusqu'ici admis — sans pour autant s'en passer totalement. Ainsi, en novembre 2024, François Hammer, astrophysicien à l'observatoire de Paris, avait avancé cette hypothèse dans une étude sur la Voie lactée, à partir des relevés de Gaia. Il avait conclu à une masse de matière noire dans notre galaxie revue sérieusement à la baisse. Aujourd'hui, il récidive avec la galaxie d'Andromède (M31), dans une étude publiée en février dans *Astronomy & Astrophysics*.

Selon ses dernières estimations, Andromède « pèse » 450 milliards de masses solaires, soit deux à quatre fois moins que les estimations précédentes. *« Dans cette étude, nous avons cherché à englober la totalité des résultats connus sur Andromède, une galaxie étudiée depuis longtemps,* résume François Hammer. *Récemment encore, les programmes Phast* [Panchromatic Hubble Andromeda Southern Treasury] *et Phat* [Panchromatic Hubble Andromeda Treasury] *de la Nasa ont livré des informations sur 200 millions d'étoiles de la galaxie. Toutes ces données dessinent une histoire d'Andromède qui nous a amenés à réviser sa masse.* »

Cette galaxie est aussi bien connue des astronomes amateurs : son diamètre apparent est six fois plus grand que celui de la pleine Lune, mais sa faible luminosité — elle se trouve à 2,5 millions d'années-lumière — nécessite un instrument pour la contempler. Longtemps considérée comme une jumelle de la Voie lactée en raison de sa structure spirale, elle s'en distingue pourtant profondément. *« En réalité, il est difficile d'imaginer deux galaxies spirales plus différentes »*, s'amuse l'astrophysicien. Contrairement à notre galaxie, qui n'a pas connu de collision majeure depuis 10 milliards d'années, Andromède a subi un choc il y a seulement 2,5 milliards d'années. Cette fusion a profondément modifié sa structure,



◀ Photomosaïque de la galaxie d'Andromède, réalisée à partir de quelque 600 clichés pris par le télescope spatial Hubble pendant dix ans d'observation.

NASA, ESA, BENJAMIN F. WILLIAMS (UWASHINGTON), ZHUO CHEN (UWASHINGTON), L. CLIFTON JOHNSON (NORTHWESTERN), JOSEPH DEPASQUALE (STSCI)

notamment en épaississant son disque où se trouvent la majorité des étoiles, du gaz et de la poussière interstellaires. Cet épaississement est une conséquence des perturbations gravitationnelles subies par les étoiles lors du mélange des deux galaxies *(lire l'encadré)*.

Pour estimer la masse d'Andromède, qui comprend la matière visible (étoile, gaz) et la matière noire, François Hammer et ses collègues ont utilisé quelque 500 modèles de fusion entre galaxies afin d'estimer la distribution du gaz d'Andromède en fonction de la distance au centre galactique après la fusion. *« Nous avons joué sur plusieurs paramètres afin d'aboutir à un modèle qui reproduit plusieurs caractéristiques d'Andromède, par exemple une vitesse accrue du gaz aux limites de la galaxie. Cela correspond au fait que 2,5 milliards d'années après la collision, de la matière continue de "tomber" sur Andromède. »*

Mais le principal enseignement de cette étude est que le modèle ne fonctionne que pour une masse bien plus faible qu'estimée jusque-là. Comme la masse visible — étoiles et gaz — ne peut être réduite puisqu'on la voit bien, c'est la part de matière noire qui diminue. *« Cela augmente mécaniquement la part de matière ordinaire qui représente au minimum un tiers de la masse totale, alors que les modèles cosmologiques prédisent un ratio d'environ un sixième. Cela semble en contradiction avec ces modèles »*, constate François Hammer.

Une ressemblance certaine avec les observations

Pour Françoise Combes, titulaire de la chaire Galaxies et cosmologie au Collège de France, il faut néanmoins rester prudent : *« Andromède est une galaxie spirale très perturbée. De nombreuses études ont montré des traces de plusieurs fusions majeures ou mineures, dans un passé très récent. Il faudrait des milliers de modèles de fusion pour avoir une idée globale de toutes les possibilités, et peut-être statistiquement avoir une idée de la quantité de matière noire autour du système. »*

Prudence partagée par Jean-Baptiste Salomon, docteur en astrophysique : *« C'est une jolie simulation qui présente une ressemblance certaine avec les observations et dessine un scénario de fusion plausible, mais il est difficile d'en dire plus. Il est pour l'instant impossible d'y appliquer des équations théoriques, ou de généraliser ce modèle à d'autres galaxies. »*

Or, justement, il faudrait étudier d'autres galaxies proches afin de vérifier si la tendance à une diminution des besoins en matière noire se confirme. Jean-Baptiste Salomon n'en reste pas moins confiant. *« Je suis tout à fait en accord avec cette tendance. J'ai d'ailleurs publié des travaux qui mettent en lumière des déséquilibres dans la Voie lactée et Andromède, ce qui peut engendrer une surestimation de la quantité de matière noire nécessaire. Jusqu'ici, nous étudiions les galaxies en nous basant sur des moyennes, en supposant que les étoiles et le gaz étaient en équilibre. Désormais, nous disposons d'instruments bien plus précis qui nous permettent d'observer des variations locales et de constater que les systèmes sont hors équilibre. Face à cela, deux options s'offrent à nous : ajouter de la matière noire pour corriger ces déséquilibres, ou bien en rechercher l'origine physique. »* De plus en plus, la communauté explore la seconde solution, en mettant en avant des causes externes, comme les fusions galactiques. Si la matière noire demeure indispensable à l'équilibre de l'Univers, une révision à la baisse de son abondance conduirait à revoir les modèles cosmologiques. ■ **Fabrice Nicot**

COLLISIONS

Deux étoiles, deux destins

Dans la Voie lactée, une étoile comme le Soleil suit une trajectoire stable, avec une vitesse de rotation de 235 km par seconde et des mouvements perpendiculaires très limités (environ 10 km/s). Rien à voir dans la galaxie d'Andromède. Une étoile de même âge que le Soleil, et située à peu près à la même distance du centre de la galaxie, aura la même vitesse de rotation mais plus du tout la même vitesse perpendiculaire, de l'ordre de 100 à 150 km/s. L'étoile bouge dans tous les sens ! C'est la conséquence des nombreuses collisions subies par Andromède.

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

DUSAULT

Quand un chatbot chinois bouscule le monde de l'IA

Le modèle de langage chinois Deepseek revendique des performances équivalentes à celles d'OpenAI mais obtenues avec beaucoup moins de ressources. La méthode de développement apparaît comme un désaveu pour la course au gigantisme en vogue dans l'IA.

Apparu fin décembre 2024, le modèle de langage (LLM) chinois Deepseek V3 (de Deepseek AI) n'a pas affolé grand monde. Jusqu'à la mise en ligne pour le grand public, le 20 janvier, de l'agent conversationnel Deepseek, une interface à la ChatGPT basée sur une nouvelle version de l'algorithme, Deepseek R1. En une semaine, l'application est devenue la plus téléchargée sur l'AppStore et GooglePlay.

Mais Deepseek n'est pas qu'un succès public. Les performances détaillées par l'équipe chinoise dans son article de recherche font du LLM un équivalent des américains Claude-Sonnet-3.5 (Anthropic), GPT-4o (OpenAI) et LLaMA 3.1 (Meta). Or, elles auraient été obtenues avec seulement 2048 microprocesseurs graphiques (GPU), contre plusieurs dizaines de milliers pour GPT ou d'autres, et 5,576 millions de dollars, contre 80 à 100 millions pour GPT-4. Si ce coût ne concerne que la version finale de Deepseek, sans inclure ses itérations précédentes ni la constitution du corpus d'entraînement, il bouleverse le dogme des performances des LLM intimement liées à la puissance de calcul. Un

8
modèles publiés en « open source » par Deepseek AI, dont six combinent les LLM Qwen 2.5 (Alibaba) ou Llama 3 avec des données de Deepseek R1

credo qui mobilise des investissements colossaux, avec pour effet de concentrer le secteur aux mains de quelques grands acteurs. Enfin, l'algorithme est (en partie) en *open source*, réutilisable et modifiable par tout développeur, quand les modèles d'OpenAI ou Google sont fermés. *« Pour une fois, l'innovation ne se situe pas sur le plan des fonctionnalités mais dans les fondations du modèle,* estime Julien Floch, expert IA au cabinet Wavestone. *C'est une belle avancée. »*

Des données stockées sur des serveurs en Chine

Passé la sidération, les critiques ont fusé. OpenAI accuse son concurrent chinois d'avoir utilisé des données générées par ChatGPT pour entraîner son modèle (pratique interdite par les conditions d'utilisation d'OpenAI). Certains doutent de l'économie de moyens revendiquée. Par ailleurs, la GPDP italienne, équivalent de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil), a interdit le service et son homologue irlandaise demande des éclaircissements à Deepseek AI. Et pour cause : les conditions d'utilisation de l'agent conversationnel stipulent que les données de ses utilisateurs, telles l'adresse IP, la langue, les frappes de clavier, des identifiants d'appareils, le système d'exploitation, etc., sont stockées sur des serveurs situés en République populaire de Chine.

LE MOT DU MOIS

« Open source »

Cette notion implique la publication du code d'un logiciel, la possibilité pour des développeurs de le modifier, de l'intégrer à leurs travaux, de manière collaborative et décentralisée. En pratique, tout n'est pas toujours clair. Meta présente son modèle Llama 3.1 comme ouvert, malgré toute une liste de restrictions et de conditions. Concernant Deepseek, seule la version de test est disponible, pas les versions qui montreraient comment il a été entraîné. Et, comme souvent, les données d'apprentissage, ou même leur descriptif, sont inconnues. *« On ne peut pas reproduire la méthode ni comprendre la capacité de généralisation de l'algorithme »*, note Francis Bach, spécialiste d'apprentissage automatique à l'Inria.

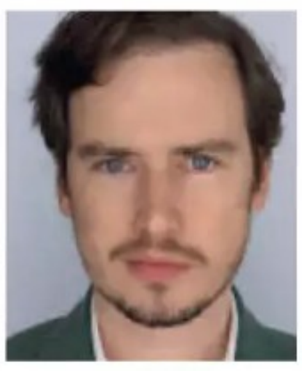
« Cela veut dire que ces données peuvent être réutilisées pour entraîner des modèles chinois et sont aussi accessibles aux autorités chinoises, note Julien Floch. *C'est un bon moyen pour le pays de récupérer quantité de données au-delà de son Grand Firewall* [la censure étatique appliquée à l'Internet en Chine]. » Autre élément gênant : le chatbot respecte la censure chinoise sur des sujets tels les manifestations sur la place Tian'anmen en 1989, les Ouïghours ou Taïwan. L'algorithme étant *open source* et entraîné sur des données du Web global, il est néanmoins possible de neutraliser cet aspect.

Ce psychodrame est largement dicté par la géopolitique. *« Il n'y en a pas eu dans la communauté scientifique,* souligne Francis Bach, spécialiste d'apprentissage automatique à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). *Les progrès de recherche se font par paliers, à partir d'idées qui sont dans l'air. La difficulté consiste à les assembler pour les faire fonctionner ensemble. C'est ce qu'ils ont su faire. »* Deepseek privilégie par exemple un apprentissage par renforcement simulant un raisonnement, plutôt qu'un apprentissage de problèmes linguistiques visant la prédiction de mots. Pour optimiser l'usage des ressources, l'équipe a opté pour une architecture consistant à ne mobiliser que certains bouts de l'algorithme sur des tâches spécifiques. *« Cette technique existe depuis 40 ans mais marchait sur des données très simples,* ajoute Francis Bach. *C'est autre chose de l'appliquer à un modèle qui fait plusieurs gigas de mémoire. »* Des zones d'ombre subsistent, mais si la méthode se confirme, elle peut dynamiser le déploiement d'IA locales, embarquées sur des appareils sans connexion à des serveurs. Microsoft propose déjà des versions de Deepseek R1 sur les ordinateurs portables Copilot+. Ce qui ne résout pas tous les problèmes de coûts énergétiques : *« L'effet rebond est classique des technologies de ce type, d'usage général : si l'on divise le coût par 10, ce sera utilisé 10 ou 20 fois plus »*, avertit Francis Bach, qui travaille aussi sur des projets d'IA frugale. ■

Arnaud Devillard

POUR EN SAVOIR PLUS

Déclaration de la Fondation pour le logiciel libre concernant Llama 3.1 : **sciav.fr/937llama**



JULIEN FLOCH

> “ Pour une fois, l'innovation ne se situe pas sur le plan des fonctionnalités mais dans les fondations du modèle ”
>
> **Julien Floch,** expert IA chez Wavestone

KARSTEN SCHNEIDER / SPL / SUCRÉ SALÉ

La fin du Gulf Stream ?

Une lettre ouverte signée par 44 des meilleurs climatologues alerte sur le risque imminent d'un ralentissement, voire d'un arrêt des courants océaniques de l'Atlantique, avec comme conséquence un grand coup de froid en Europe. Les conditions de vie de tout le bassin de cet océan pourraient devenir insupportables pour les humains. Plus globalement, le climat de la planète serait durablement déréglé.

Dossier réalisé par
Loïc Chauveau et
Sylvie Rouat

MODÉLISATION
La machine océanique au bord du basculement p. 40

EUROPE
Coup de froid en hiver et vagues de chaleur en été p. 45

MONDE
Sur toute la planète, les cartes climatiques rebattues p. 48

La machine océanique au bord du basculement

L'Amoc, un ensemble de courants océaniques qui comprend notamment le Gulf Stream, pourrait ralentir voire s'arrêter. En cause, la fonte rapide des glaciers du Groenland qui abaisse la salinité des eaux de surface. Un scénario aux conséquences catastrophiques pour l'ensemble de la planète.

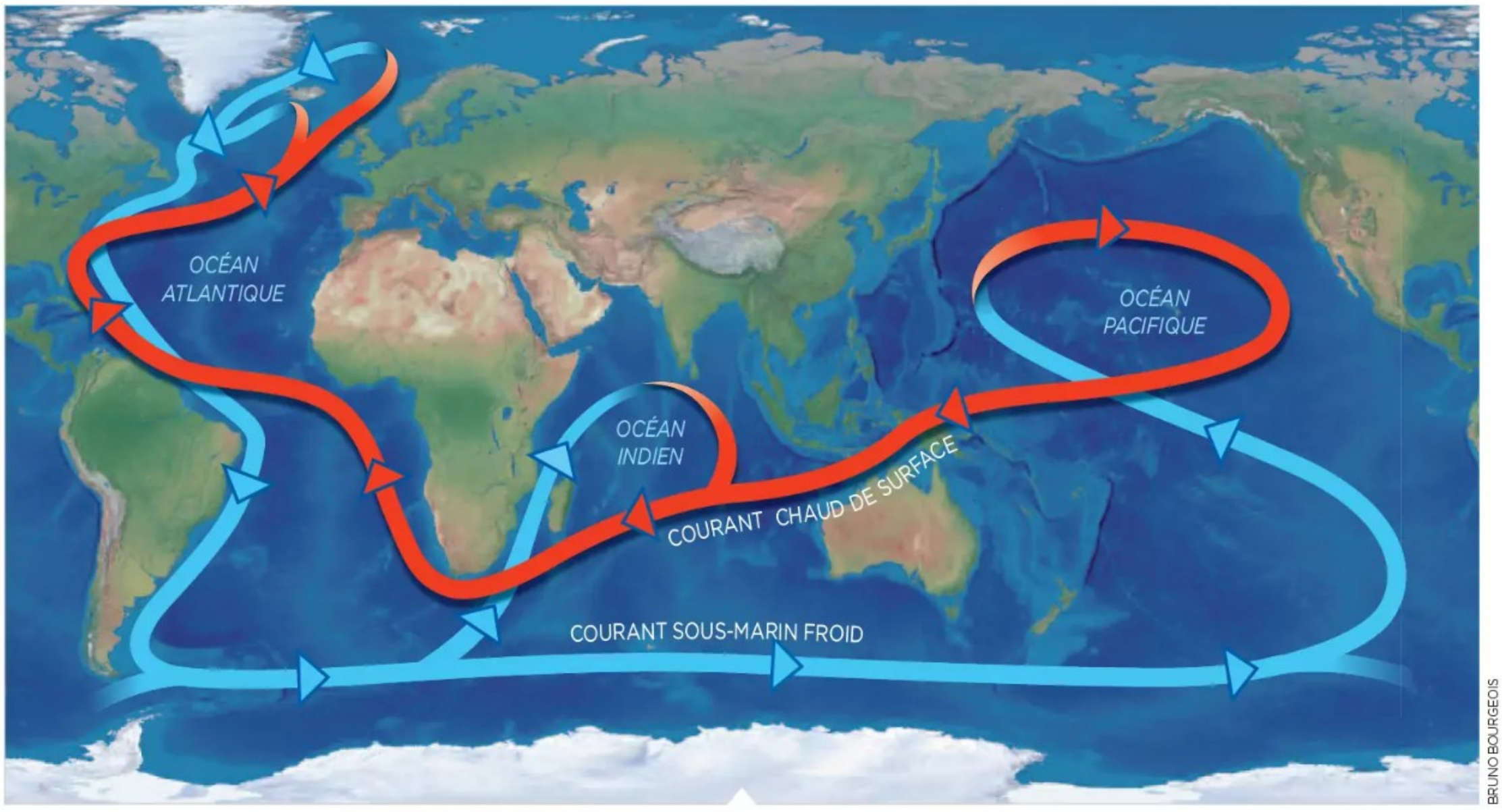
Un avertissement solennel. La lettre ouverte envoyée en octobre 2024 par 44 des meilleurs climatologues spécialistes des courants océaniques sonne le tocsin auprès des ministres du Conseil nordique réunissant les États riverains de la mer Arctique*. Ils les pressent de prendre rapidement en compte dans leurs décisions le risque imminent d'un ralentissement, voire d'un arrêt de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (Amoc selon l'acronyme anglais). Ce sont en effet les conditions de vie de tout le bassin de cet océan qui pourraient devenir insupportables pour les humains. Et il sera alors trop tard pour faire machine arrière.

L'océan est traversé par d'immenses flux de chaleur et de salinité. L'Amoc en est une des « branches ». Il démarre dans le golfe du Mexique avec la formation du Gulf Stream. Ce courant chaud au débit équivalent à 100 fois celui de l'Amazone est créé par la rotation de la Terre. Il longe les côtes américaines de Floride avant de se désagréger en multiples tourbillons au large du cap Hatteras en Caroline du Nord. « *Une partie de ces masses d'eau — environ 20 % — traverse le bassin atlantique d'ouest en est et poursuit sa route vers le nord, tandis que 80 %* [l'Amoc] *retourne vers le sud,* décrit Julie Deshaies, chercheuse au Laboratoire d'océanographie et du climat (Locean, CNRS/MNHN/IRD/Sorbonne Université) dans *CNRS Le journal*. *On retrouve ensuite un courant sud-nord bien identifié au large de Terre-Neuve, qui se casse à nouveau en petits tourbillons en partant vers le large.* » Ce n'est donc pas le Gulf Stream en lui-même qui adoucit le climat de l'Ouest européen, comme l'enseignent les livres de géographie, mais cette multitude de flux océaniques de surface que révèlent très bien les images satellite.

L'Amoc transporte à partir des zones tropicales des quantités de chaleur estimées à un million de milliards de watts. « *Cela représente à peu près 50 fois la consommation d'énergie de toute l'humanité, ou encore 3,5 fois la quantité totale de chaleur que l'océan global a absorbée ces dernières décennies, du fait des émissions de gaz à effet de serre générées par l'humain* », affirme Stefan Rahmstorf, professeur à l'université de Potsdam (Allemagne) et l'un des meilleurs connaisseurs de l'Amoc. C'est un grand chauffage central. Grâce aux courants, l'énergie solaire des tropiques est évacuée vers les zones septentrionales où le rayonnement est bien plus faible. Toute cette énergie est bien responsable du climat océanique doux dont bénéficie notamment la France, mais indirectement car la chaleur est transportée par les vents qui s'en chargent lorsqu'ils entrent en contact avec la surface de l'eau. Outre la mer du Labrador, entre le continent américain et le Groenland, les courants de l'Amoc remontent également en mer d'Islande et jusqu'en Arctique. « *Ces eaux chaudes ont une autre particularité : elles sont moins salées que dans le nord car elles reçoivent beaucoup de pluies, au contraire des zones arctiques plus sèches* », poursuit Didier Swingedouw, chercheur CNRS à l'unité de recherche Environnements et paléoen-

18
millions de m³/s
Le débit du Gulf Stream, soit 100 fois celui du fleuve Amazone.

4 %
La diminution de sa vitesse ces quarante dernières années.



BRUNO BOURGEOIS

Fonctionnant comme un tapis roulant, la circulation thermohaline transporte les masses d'eaux chaudes de surface de l'équateur vers le nord de l'océan Atlantique. Ces masses d'eaux se refroidissent sous ces hautes latitudes et plongent alors en profondeur avant de retourner vers l'Atlantique Sud et de remonter pour boucler la boucle.

vironnements océaniques et continentaux (UMR Epoc), à Bordeaux.

À mesure que les eaux remontent vers le nord, elles délivrent leur chaleur aux vents et se chargent en salinité. Elles deviennent ainsi plus denses et plongent à environ 2000 à 3000 mètres de profondeur pour former un courant froid qui va retourner vers les tropiques. Cette circulation « thermohaline » est mondiale. Ce courant froid continue sa course dans l'Atlantique Sud, passe le cap de Bonne-Espérance à l'extrême sud de l'Afrique pour remonter dans l'océan Indien, se réchauffer et repartir en sens inverse, revenir en Atlantique et se joindre au Gulf Stream. Avec ces courants, l'océan est le vrai régulateur du climat, une prise de conscience relativement récente. Jusque dans les années 1990, en effet, et avant qu'océanologues et climatologues n'unissent leurs forces, on pensait que c'était l'atmosphère qui régissait le climat.

Que craignent les signataires de la lettre ouverte au Conseil nordique ? « *Le changement climatique est en train de provoquer une fonte rapide des glaciers du Groenland et de la calotte glaciaire,* détaille Didier Swingedouw, qui est par ailleurs signataire de la lettre ouverte. *Cet apport en eau douce va abaisser la salinité des eaux et donc leur densité, et diminuer leur faculté à s'enfoncer dans les profondeurs.* » L'Amoc pourrait ainsi ralentir puis progressivement s'arrêter. Un phénomène irréversible qui aurait des impacts sur le climat de la Terre entière (*lire p. 48*).

Cette évolution est principalement décrite par les modèles climatiques. En introduisant dans leurs algorithmes les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, les modélisateurs peuvent reconstituer les réactions de l'océan, des vents, des courants, des apports en eau douce, et ce en multipliant les climats futurs possibles. Nourris par des milliards de données météo, les modèles numériques ne cessent de gagner en précision, réduisant ainsi la palette des scénarios plausibles. Mais cela reste des simulations. Au

POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH

« La quantité de chaleur transportée par l'Amoc représente à peu près 50 fois la consommation d'énergie de toute l'humanité »

Stefan Rahmstorf, océanographe et climatologue, professeur à l'université de Potsdam (Allemagne)

PAUL A. DODD, NORWEGIAN POLAR INSTITUTE.

Les prélèvements effectués dans l'océan Arctique par les chercheurs de l'Institut polaire norvégien à bord d'un navire-laboratoire leur permettent d'étudier le taux de salinité des eaux et les flux océaniques.

moment de l'écriture, les rédacteurs du sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) ont donc dû tourner sept fois leur plume dans l'encrier. Quelles conclusions tirer de ces travaux théoriques ? Pour le Giec, l'état de l'art autour de l'évaluation de l'Amoc ne permet pas — provisoirement — de conclure. « *Il y a une confiance moyenne dans le fait que l'Amoc ne s'effondrera pas brutalement avant 2100, mais si cela devait arriver, cela causerait certainement des changements brutaux de la météo que nous connaissons dans la région arctique, avec de forts impacts sur les écosystèmes et les activités humaines* », peut-on ainsi lire dans ce sixième rapport remis en 2022.

Pour sortir de ces incertitudes, rien de tel que de récolter des données en mer afin de suivre des évolutions dans le temps et nourrir les modèles de mesures physiques. C'est dans ce but qu'ont été lancés les programmes Rapid, Osnap et Epoc. En 2004, avec des financements principalement britanniques, Rapid a mouillé des bouées mesurant en profondeur salinité et température entre la Floride et le sud du Maroc. Dix ans plus tard, le programme international Osnap est également constitué d'un réseau de bouées, mais installées cette fois en mer du Labrador et en mer d'Islande. Vingt ans, quand il s'agit de climat, c'est bien trop peu. Il faudra attendre encore quelques décennies pour pouvoir enregistrer des tendances. D'autant que les premiers constats de Rapid n'ont fait que complexifier les choses.

« *On a ainsi appris que l'Amoc connaissait des variations quotidiennes, saisonnières et décennales, alors que l'on pensait auparavant que ces courants étaient très stables sur des décennies* », s'étonne Damien Desbruyères, chercheur à l'Ifremer au Laboratoire d'océanographie physique et spatiale de Plouzané. Les vents semblent d'ailleurs jouer un rôle majeur dans cette instabilité. Deux décennies de mesures n'ont pas permis de déceler une tendance. « *Les moyennes sur une année montrent deux périodes : de 2004 à 2015, l'intensité de l'Amoc a diminué, et depuis, elle*

INUA PRODUCTION

« L'Amoc connaît des variations quotidiennes, saisonnières et décennales, alors qu'on pensait que ces courants étaient très stables »

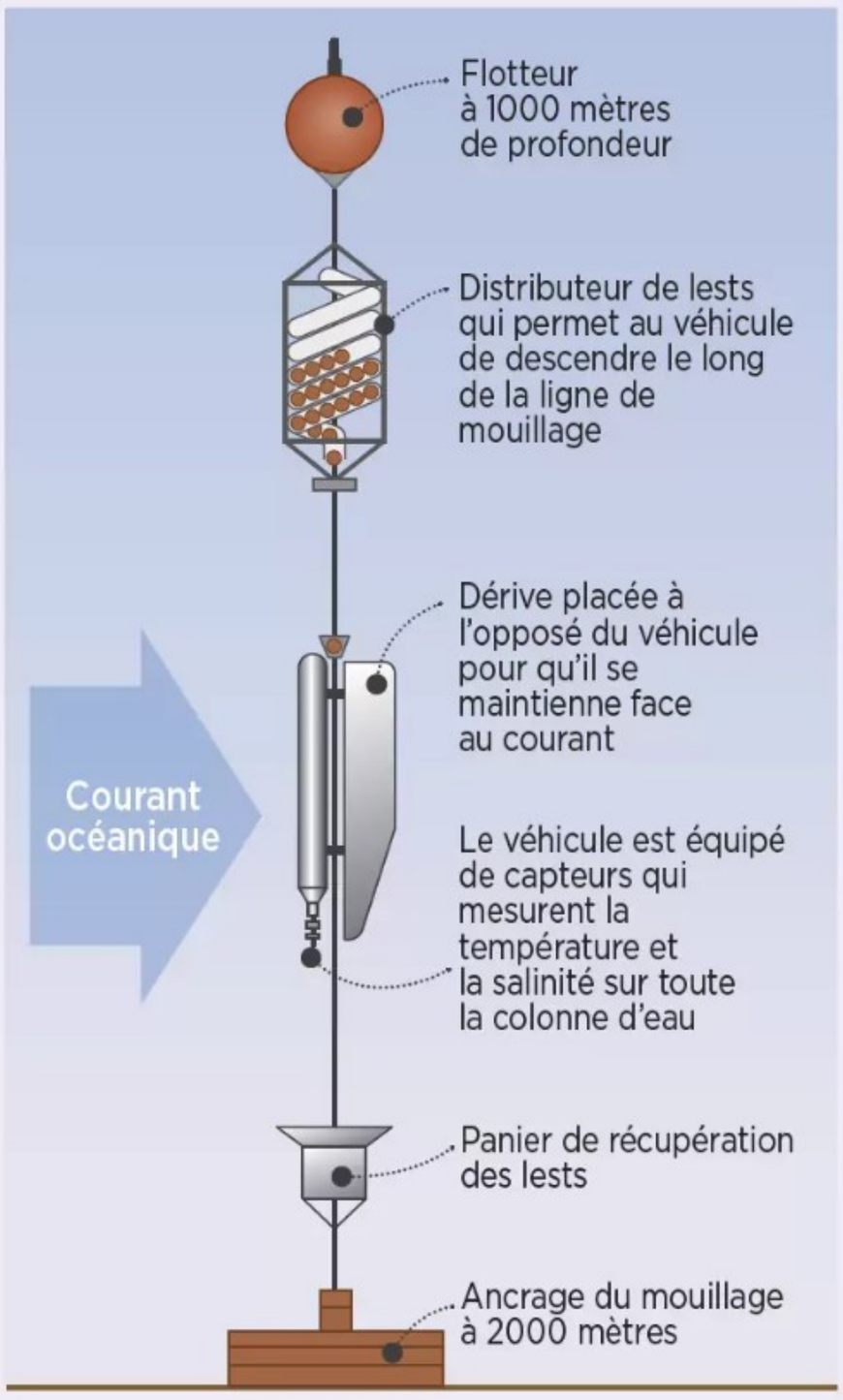
Damien Desbruyères, chercheur Ifremer au Laboratoire d'océanographie physique et spatiale de Plouzané

augmente à nouveau. Difficile d'en tirer des conclusions à ce stade », constate Julie Deshaies.

Depuis 2022, le programme européen Epoc (Explaining and predicting ocean conveyor, expliquer et prédire la circulation océanique) s'intéresse, lui, plus précisément à une région particulière de l'océan Atlantique, les Grands Bancs de Terre-neuve, au large du « bonnet flamand » (*cap flemish* en anglais), des hauts-fonds (120 mètres de profondeur) bordés d'une falaise abrupte. Ce lieu est connu comme une zone de rencontre entre les eaux chaudes de l'Amoc et celles, froides, du courant du Labrador. *« C'est un lieu extrêmement agité qui est idéal pour comprendre comment fonctionne le retournement des eaux* », note Damien Desbruyères. Le but d'Epoc est ainsi d'engranger des données qui vont permettre de construire un modèle qui pourra être utilisé à l'échelle de quelques jours à quelques années. Le programme Crossroad de l'Ifremer (*voir l'encadré ci-dessous*) en est une des composantes instrumentales.

Une compilation de données recueillies depuis 1982

Il faudra donc attendre des années pour voir émerger des tendances de long terme. Ce qui n'a pas empêché les climatologues d'alerter le Conseil nordique. La principale raison, c'est que depuis le sixième rapport du Giec, de nouveaux résultats ont été engrangés. Le plus spectaculaire est celui apporté par une équipe de l'Institut océanographique de Woods Hole (Massachusetts, États-Unis) dans le numéro de *Geophysical Research Letters* d'octobre 2023. Les chercheurs ont compilé toutes les données recueillies depuis 1982 dans le détroit de Floride, entre les côtes américaines, Cuba et les Bahamas, soit en plein cœur du Gulf Stream. Trois sources principales ont été utilisées : des mesures *in situ* de la force des courants par des navires océanographiques, les données apportées par les câbles sous-marins et l'altimétrie satellitaire qui permet d'observer le relief des océans. Résultat : le Gulf Stream a bien vu sa vitesse diminuer de 4 % ces quarante dernières années, un ralentissement qui ne peut qu'avoir un impact sur l'Amoc. Cette équipe prévient cependant : il ne s'agit que d'un constat. *« Bien que nous puissions définitivement affirmer que l'affaiblissement du courant est bien en cours, nous ne sommes pas capables de dire dans quelle mesure cela est relié au*



BRUNO BOURGEOIS

DISPOSITIF

L'Ifremer scrute les eaux profondes atlantiques

Comment les eaux de l'Amoc voyagent-elles dans les profondeurs océanes ? Pour le comprendre, l'Ifremer a installé en septembre 2024 des bouées à proximité des Grands Bancs de Terre-Neuve. Cette zone connaît de forts courants qui se heurtent à un relief sous-marin complexe, ce qui perturbe le transport des eaux profondes et froides vers le sud. L'institut français a développé un outil qui permet de mesurer pendant plusieurs mois et par le seul principe d'Archimède la façon dont des masses d'eau de température et de salinité différentes se mélangent. *« En haut de la ligne de mouillage, un distributeur dépose chaque jour un lest sur le véhicule des appareils de mesure qui stationne en attente en dessous,* détaille Bruno Ferron, concepteur du système à l'Ifremer. *Ce lest de 1,3 kg suffit à faire couler le long d'un filin l'appareil qui se déplace ainsi avec pour seule source d'énergie la gravité. 1000 mètres plus bas, le véhicule vient taper sur une butée fixée sur la ligne, ce qui actionne un levier libérant le lest qui tombe dans un panier. L'appareil ainsi allégé remonte naturellement vers la surface.* » La manœuvre se répète des dizaines de fois. En septembre, *Atalante*, le navire de l'Ifremer, reviendra récupérer les bouées et les données qui auront été ainsi enregistrées par les appareils de mesure.

ELEANOR FRAJKA-WILLIAMS

Les scientifiques du programme Rapid continuent de déployer des bouées afin d'affiner les mesures de salinité et température de l'Amoc.

changement climatique ou si c'est une variation naturelle », prévient Christopher Piecuch, principal auteur de l'article. Mais le résultat est inédit.

L'autre signal d'alarme provient d'une étude publiée dans *Science Advances* en février 2024. Trois chercheurs de l'université d'Utrecht (Pays-Bas) ont utilisé les versions les plus récentes d'un panel de différents modèles couplés de simulations de l'atmosphère et de l'océan. Leurs résultats montrent que l'Amoc serait en cours d'affaiblissement depuis au moins un millénaire. Le ralentissement irait en s'accentuant dans les prochaines décennies, avec l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la fonte des glaces arctiques et le déversement continu d'eau douce dans l'océan. En conclusion, le ralentissement de l'Amoc est en train d'atteindre un point de bascule qui pourrait intervenir dans les deux prochaines décennies. Contrairement à ce que dit le Giec, l'Amoc pourrait non seulement ralentir, mais aussi s'arrêter complètement bien avant la fin du siècle, peut-être à sa moitié !

Le point de bascule aura lieu entre 2050 et 2130

C'est ce qui a motivé le courrier au Conseil nordique. Cependant, si l'ensemble des climatologues et océanologues ont signé le texte, c'est qu'il reste malgré tout modéré. Il s'agit en effet d'un appel à agir maintenant pour réduire les émissions anthropiques des gaz à effet de serre et à inciter les États riverains de l'Arctique à s'adapter à un climat qui devrait être beaucoup plus froid qu'aujourd'hui. Si aucun des chercheurs ne conteste le risque de ralentissement, c'est l'intensité du phénomène et sa proximité dans le temps qui sont discutées. « *L'Amoc est un flux équivalent à 20 fois le débit de l'Amazone, tandis que l'apport en eau douce de la fonte actuelle des glaciers groenlandais représente un dixième du flux de l'Amazone ou quatre fois le débit de la Seine* », pondère Didier Swingedouw. Par ailleurs, la hausse des températures aux tropiques du fait du changement climatique pourrait augmenter la salinité des eaux de l'Amoc en raison d'une évaporation plus forte, et contrer ainsi l'apport en eau douce des glaciers. Des « rétroactions » dont on ne sait aujourd'hui pas grand-chose.

Le consensus des scientifiques se renforce cependant. Quand sera atteint le point de bascule, ce seuil irréversible après lequel plus rien ne sera comme avant ? Entre 2050 et 2130, la fenêtre demeure à la dimension d'une vie humaine. Il reste de toute façon peu de temps pour éviter le film catastrophe. ■ **L. C.**

* Danemark et les deux territoires autonomes Groenland et îles Féroé, Norvège, Suède, Islande, Finlande.

HISTOIRE

Comment l'Amoc a été découvert

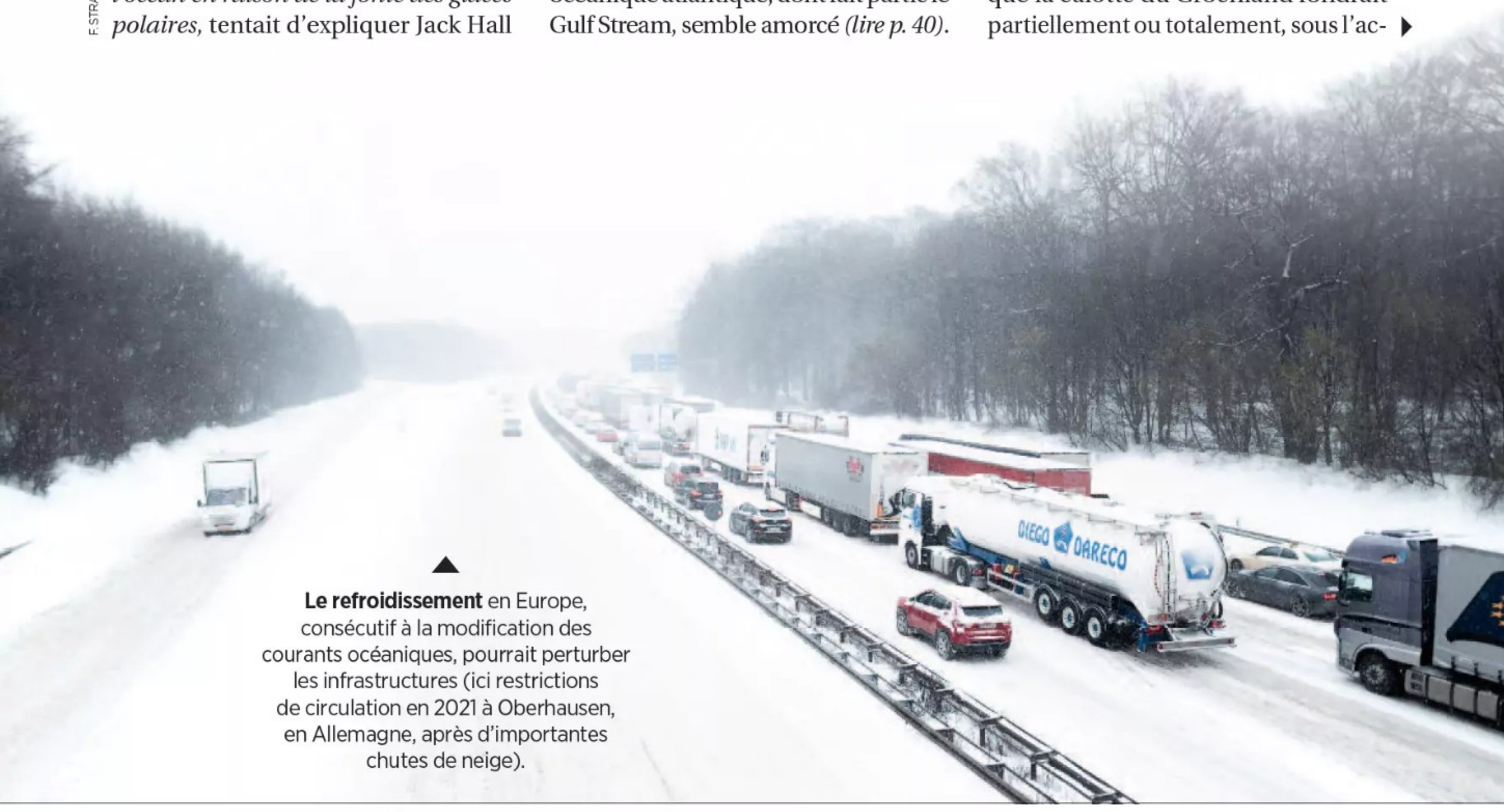
En 1751, l'homme d'Église et scientifique anglais Stephen Hales demande au capitaine d'un navire négrier, Henry Ellis, d'effectuer une expérience dans les eaux tropicales. Il s'agit de plonger un seau à clapet dans les eaux profondes pour en remonter des échantillons et en mesurer la température. Constat du capitaine : entre 1100 et 1600 mètres de profondeur, les eaux gardent la même température de 11 °C, soit bien en dessous des 25 °C en moyenne des eaux de surface. Les couches inférieures de l'océan n'accumulent donc pas la chaleur bien qu'elles soient exposées au soleil des tropiques depuis des millions d'années, conclut Stephen Hales sans aller plus loin. Le capitaine Ellis, lui, en profitera pour rafraîchir les corps des marins et mettre au frais les boissons en puisant cette eau fraîche. Mais il faudra attendre 1791 pour que le physicien britannique Benjamin Thompson ne publie la seule explication possible : ces eaux froides en région tropicale ne peuvent provenir que de la zone arctique grâce à un courant profond.

Coups de froid en hiver et vagues de chaleur en été

Selon les modèles, un affaiblissement de l'Amoc devrait valoir à l'Europe un grand coup de froid. Les observations satellitaires et océanographiques ont déjà révélé une zone anormalement froide depuis plusieurs décennies au sud du Groenland.

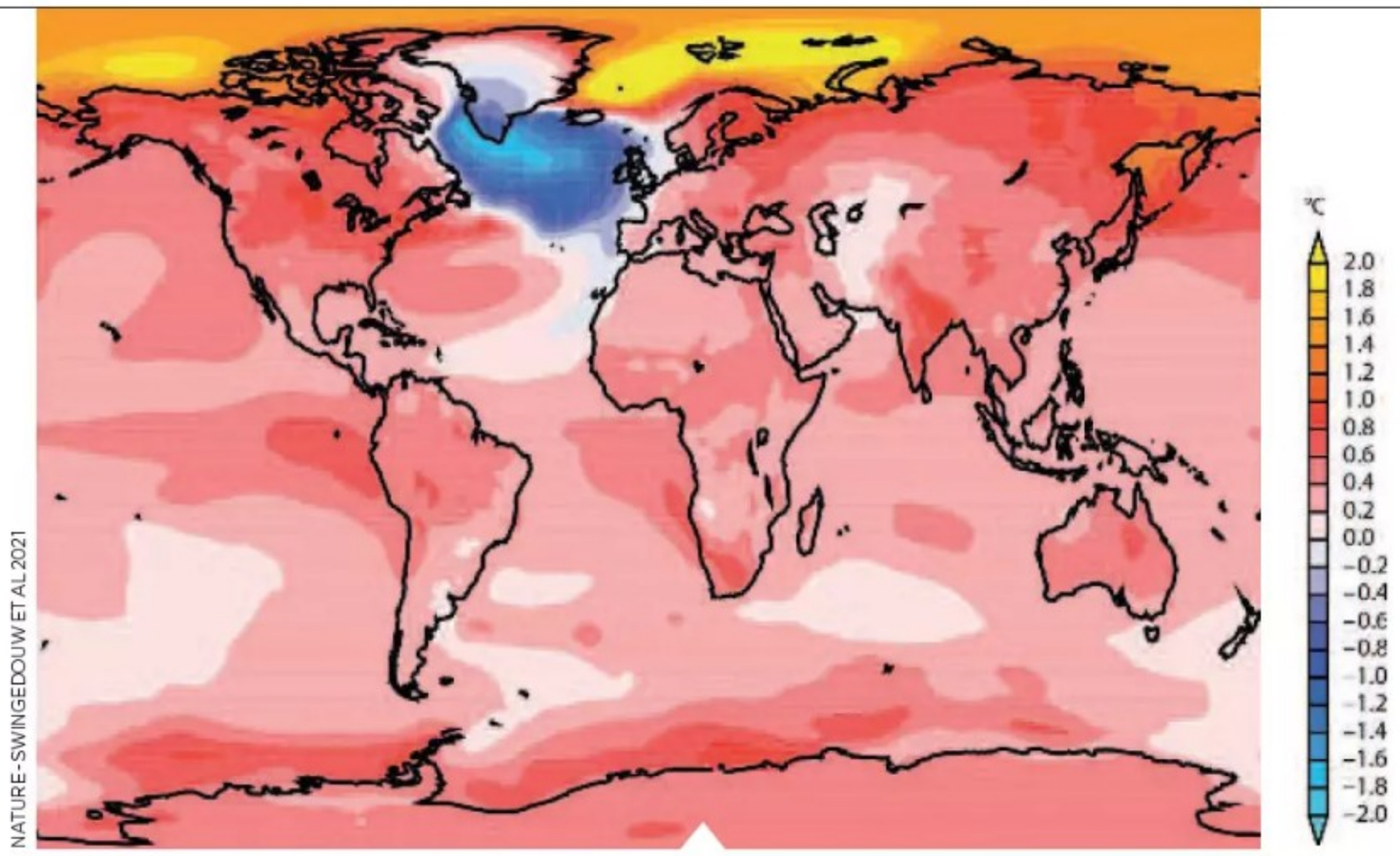
Le Jour d'après, film de Roland Emmerich, mettait en scène il y a vingt ans la ville de New York ensevelie sous une gigantesque couche de neige et de glace. « *Personne n'a pris en compte la quantité d'eau douce déversée dans l'océan en raison de la fonte des glaces polaires,* tentait d'expliquer Jack Hall (Dennis Quaid), le héros climatologue, aux gouvernants. *Je pense que nous avons atteint un point critique de dessalement.* » Si le scénario hollywoodien paraît irréaliste aux yeux des scientifiques, l'affaiblissement ou l'arrêt de la circulation océanique atlantique, dont fait partie le Gulf Stream, semble amorcé *(lire p. 40)*. C'est l'océanographe américain Henry Stommel qui, en 1961, a démontré que la circulation thermohaline — qui transporte chaleur et salinité autour du globe — pourrait exister sous plusieurs états stables, dont celui d'un arrêt, selon que la calotte du Groenland fondrait partiellement ou totalement, sous l'ac-

F. STRAUCH / DPA / AFP



Le refroidissement en Europe, consécutif à la modification des courants océaniques, pourrait perturber les infrastructures (ici restrictions de circulation en 2021 à Oberhausen, en Allemagne, après d'importantes chutes de neige).

tion du réchauffement climatique. Ce manteau glacé atteint aujourd'hui plus de 3 kilomètres d'épaisseur en son centre et représente 10 % de l'eau douce terrestre ! Or, l'introduction d'une partie de cette eau dans le système océanique salé de l'Atlantique Nord semble amorcée. Une étude dirigée par la physicienne Levke Caesar, de l'université de Potsdam (Allemagne), et publiée en 2018 dans *Nature*, apportait « *la preuve d'un affaiblissement de l'Amoc d'environ 15 % depuis le milieu du XX^e siècle* ».



En cas de non-réduction des émissions de gaz à effet de serre, la « tache froide » dans l'Atlantique Nord pourrait s'étendre (ici, modélisation à l'échéance 2100).

La salinité du bassin islandais en baisse

Deux ans plus tard, une nouvelle étude menée par l'océanographe britannique Penny Holliday, de l'université de Southampton, apportait un indice supplémentaire d'un potentiel ralentissement de l'Amoc en démontrant que le bassin islandais enregistrait aujourd'hui sa salinité la plus faible en 120 ans de mesures. À la fonte de la calotte glaciaire du Groenland s'ajoutent sans doute des apports accrus d'eau douce provenant des précipitations et des rivières, combinés aux changements de circulation océanique qui amènent des eaux subtropicales moins salées vers le nord. Si cette dynamique devait se poursuivre, voire s'accélérer à l'aune de nos émissions de gaz à effet de serre, cela aurait des implications importantes pour le Vieux Continent. « *L'un des risques les plus inquiétants pour l'Europe est celui d'un changement majeur dans les courants de l'océan Atlantique,* s'alarme Stefan Rahmstorf, océanographe de l'université de Potsdam. *Les recherches scientifiques récentes suggèrent que ce phénomène a été grandement sous-estimé dans le passé — y compris par moi, qui y ai travaillé pendant plus de trente ans.* » Selon les modèles, un affaiblissement de l'Amoc devrait nous valoir un grand coup de froid. Or, les observations satellitaires et océanographiques ont déjà révélé une zone anormalement froide depuis plusieurs décennies au sud du Groenland. Dans un article publié en avril 2024 dans la revue *Oceanography*, Stefan Rahmstorf s'inquiète de l'existence de ce « *trou de réchauffement ou "tache froide" que l'on trouve sur les cartes des changements de la température mondiale observés. Alors que l'ensemble du globe s'est réchauffé, l'Atlantique Nord subpolaire a résisté et s'est même refroidi. C'est exactement la région où l'Amoc délivre une grande partie de sa chaleur, et exactement la*

ARCHIVES GLACIAIRES

Les enseignements du passé

C'est une carotte de glace du Groenland, analysée dans les années 1960 par les équipes du chercheur danois Willi Dansgaard et du Suisse Hans Oeschger, qui a mis au jour l'influence du grand système de courants nord-atlantiques au cours des 100 000 dernières années. Cette archive glaciaire a révélé d'importantes et brusques fluctuations du climat passé, interprétées des années plus tard par le géophysicien américain Wallace Broecker comme étant potentiellement dues à l'arrêt de ce système de transport océanique. Par la suite, deux types d'événements climatiques abrupts ont été identifiés en Atlantique Nord à cette période. Plus de 20 événements dits de Dansgaard-Oeschger se sont traduits par un réchauffement de 10 à 15 °C en une à deux décennies, suivi d'un refroidissement progressif sur plusieurs siècles, lié à l'affaiblissement de la circulation océanique. Ils se sont produits à intervalles irréguliers, en moyenne tous les 1500 ans, entre -120 000 à -12 000 ans. Le deuxième type est celui des « événements Heinrich », du nom du paléoclimatologue allemand Hartmut Heinrich, qui a mis en évidence des épisodes de débâcles massives des calottes glaciaires nord-américaines à des intervalles irréguliers tous les 7000 à 10 000 ans, il y a entre 16 000 à 60 000 ans, qui ont provoqué un arrêt total de l'Amoc et un important refroidissement dans l'hémisphère Nord.

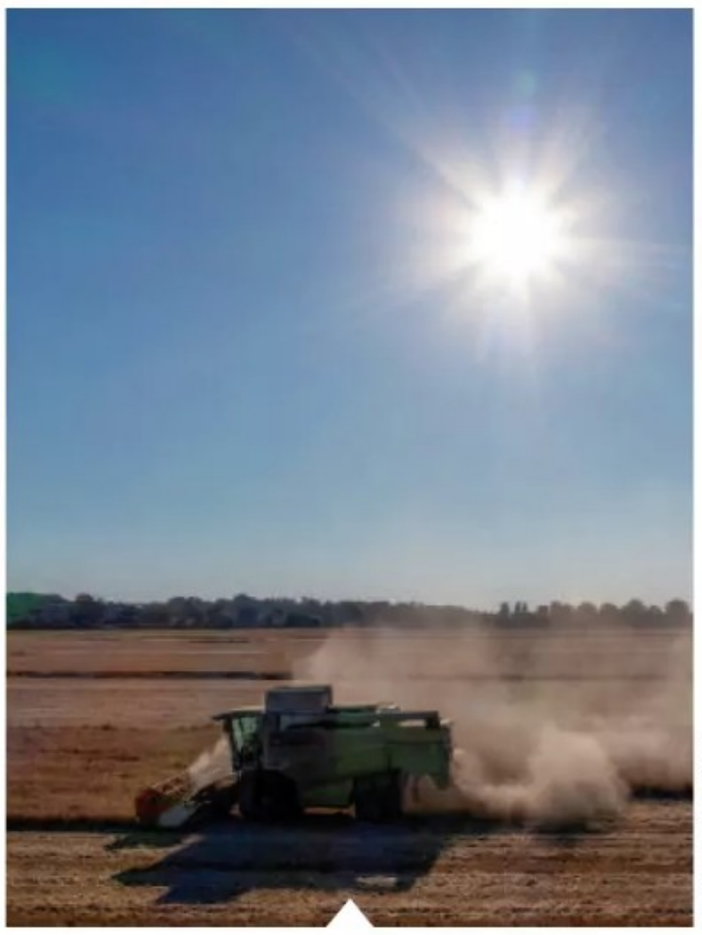
région où les modèles climatiques prédisent depuis longtemps un refroidissement en raison du ralentissement de l'Amoc. »

Si les émissions de gaz à effet de serre (GES) ne diminuent pas, cette lentille froide pourrait s'intensifier au-dessus de l'Europe de l'Ouest et sur la côte est de l'Amérique du Nord, entraînant une chute des températures. « *Dans des périodes glaciaires, des instabilités de calotte ont déjà produit des refroidissements massifs en Europe du Nord et une baisse importante de l'Amoc* », indique Gilles Ramstein, climatologue au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Pour autant, cela ne présage pas l'entrée dans un nouvel âge glaciaire. « *L'océan a surtout un effet en hiver,* explique Didier Swingedouw, chercheur CNRS à l'unité de recherche Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux (UMR Epoc), à Bordeaux. *Les zones littorales bénéficient alors d'un climat beaucoup plus doux que les régions continentales, car l'océan, dont la température hivernale demeure sur nos côtes autour de 10 °C, transfère plus activement sa chaleur à l'atmosphère aux températures les plus basses. Cela explique pourquoi il est aujourd'hui assez rare qu'il gèle en Nouvelle-Aquitaine, par exemple.* »

Sécheresses au sud et précipitations intenses au nord

Dans le même temps, l'hémisphère Sud connaîtra une élévation de ses températures. Il en résultera un fort écart de température entre les deux hémisphères. En conséquence, l'organisation dynamique de l'atmosphère sera fortement modifiée. Ainsi, cela entraînerait, par exemple en Atlantique Nord, la formation de plus de tempêtes et un changement dans la trajectoire des vents en moyenne, provoquant plus de sécheresses au sud et des précipitations intenses au nord de l'Europe.

Paradoxalement, nos étés pourraient être aussi plus chauds. Car à la belle saison, c'est l'effet du réchauffement climatique qui se fait le plus ressentir : les gaz à effet de serre, dont le pouvoir radiatif influe sur l'atmosphère globale, piègent la chaleur dans l'atmosphère, empêchant une partie de celle-ci de s'échapper dans l'espace. Réchauffement global et Amoc faible pourraient alors se conjuguer pour produire des dynamiques de circulation atmosphérique inquiétantes, quoique discutées : « *Des recherches récentes ont montré qu'un refroidissement du gyre subpolaire au sud du Groenland pourrait, en été, favoriser la formation d'anticyclones au-dessus de l'Europe, associés aux vagues de chaleur extrême, qui sont les épisodes les plus durement ressentis par nos sociétés* », souligne Didier Swingedouw.

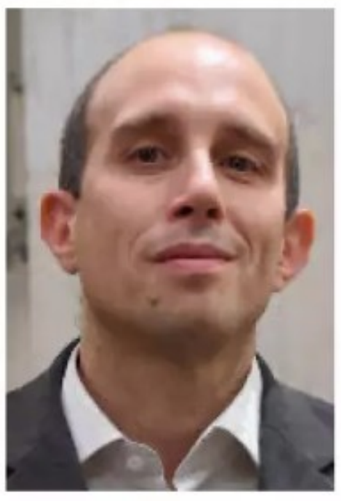


BEN STANSALL / AFP

La surface des terres cultivables au Royaume-Uni pourrait chuter de 32 % à seulement 7 %.

Un impact majeur sur la biologie et les écosystèmes

Des écarts saisonniers beaucoup plus marqués auraient un impact majeur sur la biologie et les écosystèmes. Les espèces végétales et animales qui nous entourent sont adaptées à un climat relativement stable depuis environ 10 000 ans. Des fluctuations saisonnières ont existé sur cette période, mais les changements actuels pourraient survenir à un rythme beaucoup plus rapide, mettant à l'épreuve leur capacité d'adaptation. Dans une étude publiée en 2020 dans *Nature Food*, des économistes et écologues britanniques de l'université d'Exeter se sont intéressés aux conséquences de l'effondrement de l'Amoc sur les rendements agricoles au Royaume-Uni, compte tenu du fait que l'Écosse est aux mêmes latitudes que Moscou (Russie) et le sud de l'Alaska (États-Unis). Sans la chaleur et l'humidité transportées par les courants marins depuis les tropiques, les îles britanniques seraient confrontées à « *l'arrêt généralisé des grandes cultures* » dans leurs campagnes désormais impropres à de nombreuses plantes cultivées aujourd'hui. La forte diminution des précipitations pendant la saison de croissance en serait le principal obstacle. La surface des terres arables se réduirait ainsi de 32 % du territoire à 7 % ! « *Si l'Amoc devait s'arrêter, ce serait en quelque sorte la double peine, une catastrophe dans la catastrophe du réchauffement climatique* », conclut Didier Swingedouw. ■ **S. R.**



B. EYMANN

« Un refroidissement au sud du Groenland pourrait, en été, favoriser la formation d'anticyclones sur l'Europe, associés aux vagues de chaleur extrême »

Didier Swingedouw, chercheur CNRS à l'unité de recherche Epoc, à Bordeaux.

Sur toute la planète, les cartes climatiques rebattues

Le ralentissement de l'Amoc se traduirait, dans les modélisations, par des modifications des vents et des différences de pression atmosphérique entre les hémisphères, avec des conséquences dramatiques sur la répartition mondiale des pluies.

La circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (Amoc), dont fait partie le Gulf Stream, est souvent désignée comme la « colonne vertébrale » de la dynamique des grands courants planétaires transportant chaleur et salinité autour du globe. Sans ce « tapis roulant » qui achemine la chaleur de l'hémisphère Sud et des tropiques vers l'Atlantique Nord, celle-ci demeurerait stockée dans les mers australes. Quelles en seraient les conséquences pour la distribution des différents climats régionaux ? Pour le savoir, des chercheurs de l'institut de recherche pour le développement (IRD) se sont intéressés aux événements passés de ralentissement de l'Amoc, lors d'épisodes de débâcles de glace et de vêlages massifs d'icebergs dans l'Atlantique Nord — connus sous le nom d'événements de Heinrich —, entraînant d'importantes décharges d'eau douce. « *Nos recherches paléoclimatiques portaient sur l'impact de ces événements en Afrique de l'Ouest,* explique le climatologue Dimitri Defrance, principal auteur d'une étude parue dans les *Pnas* dès 2017. *L'analyse des fossiles a montré qu'à ces périodes correspondaient des épisodes de méga-sécheresse dans la région du Sahel, tandis que la zone intertropicale s'établissait à des latitudes plus basses.* »

Le chercheur et son équipe du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) ont par la suite réalisé une nouvelle étude pour évaluer « *l'impact d'une fonte rapide partielle des calottes glaciaires du Groenland et de l'Ouest-Antarctique sur le climat et sur les systèmes de mousson, à l'échelle globale et régionale au cours du XXIe siècle* ».

Un bouleversement des saisons du nord au sud

L'Antarctique étant isolé des autres océans par le courant circumpolaire qui agit comme une barrière, son apport d'eau douce dans la machinerie globale sera modéré. En revanche, le ralentissement de l'Amoc se traduit, dans les modélisations, par des modifications des vents et des différences de pression atmosphérique entre les hémisphères qui redistribuent les ceintures de pluies. Les précipitations tropicales se déplaceraient ainsi vers le sud, en Atlantique et jusqu'à l'est du Pacifique.

En Afrique, les pluies seraient plus intenses durant l'été austral et plus rares au cours de l'été boréal. La tendance générale des modèles montre toutefois une diminution significative des précipitations en Afrique de l'Ouest. En Asie du Sud, les moussons pourraient devenir moins prévisibles ou moins robustes, ce qui pourrait entraîner des sécheresses plus fréquentes ou des inondations exacerbées lors des périodes de pluies intenses. Plus erratiques, ces nouveaux régimes de mousson pourraient varier grandement d'une année à l'autre, ce qui compliquerait la planification agricole et l'approvisionnement en eau de millions de personnes. Les saisons elles-mêmes

En Asie du Sud, les moussons pourraient devenir moins prévisibles, compliquant la planification agricole et l'approvisionnement en eau de millions de personnes

AUDU MARTE / AFP

Les inondations dans la ville de Maiduguri, au Nigeria, ont contraint 400 000 personnes à quitter leur domicile en septembre 2024.

devraient être bouleversées : la saison des pluies nord-américaine démarrerait plus tardivement ; à l'inverse de celle du continent sud-américain, plus précoce. Localement, l'Amazonie pourrait être affectée par un affaiblissement de l'Amoc. Dans une étude publiée en novembre 2024 dans *Nature Geoscience*, une équipe dirigée par Thomas Akabane et Christiano Chiessi, de l'université de São Paulo (Brésil) s'est intéressée à la réponse de la végétation amazonienne aux précédents ralentissements de l'Amoc. Elle a analysé les pollens et résidus de carbone des 25 000 dernières années à partir d'une carotte de sédiments marins prélevée à l'embouchure du fleuve Amazone. Ces données ont mis en évidence un déclin important de la forêt dans la partie nord de la région entre -18 000 et -14 800 ans, lors des événements climatiques de Heinrich corrélés à un affaiblissement de l'Amoc. Si cela devait se reproduire, cela pourrait réduire les précipitations dans le nord de la forêt tropicale et les augmenter dans le sud. Cette redistribution des pluies compromettrait la durabilité de la forêt, surtout dans les régions déjà intensément déboisées du sud et de l'est.

Le riche écosystème amazonien menacé de grave perturbation

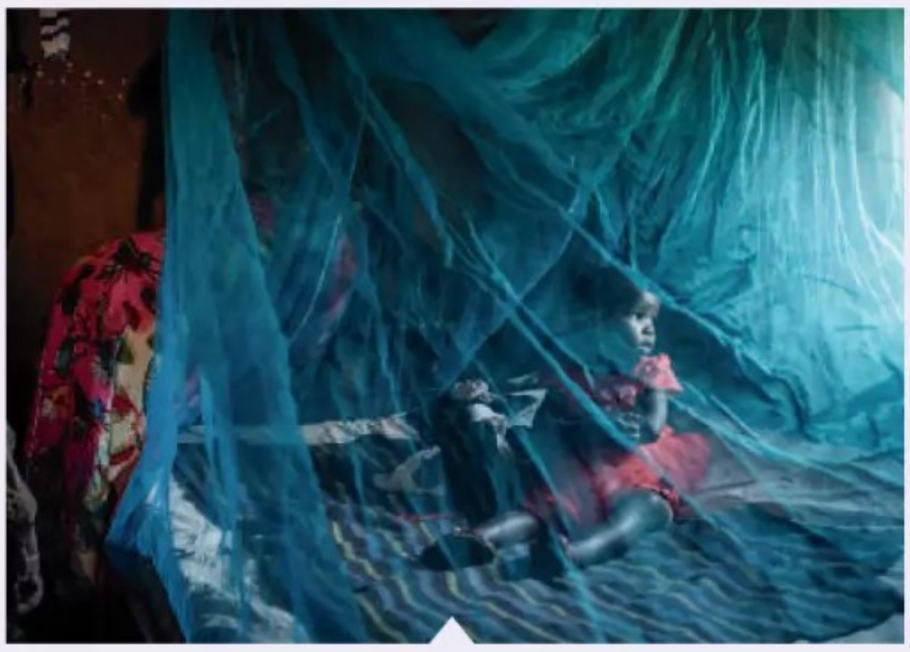
Une étude publiée en 2024 dans *Science Advances* et menée par René van Westen, chercheur néerlandais de l'université d'Utrecht, prévoit un changement radical dans les schémas de précipitations de la région amazonienne : « *La saison sèche devient la saison humide et vice versa. Ces changements de précipitations induits par l'Amoc pourraient gravement perturber l'écosystème de la forêt amazonienne et potentiellement conduire à des basculements en cascade.* »

Car cet écosystème, l'un des plus riches en espèces animales et végétales de la planète, est aussi l'un des points de bascule de notre système climatique. C'est en effet l'une de nos principales forêts tropicales, avec un couvert d'environ 5,5 millions de km², qui stocke 100 à 200 milliards de tonnes de carbone dans sa biomasse et ses sols. Déjà, la déforestation accélérée de ces dernières décennies a libéré une partie du carbone stocké, contribuant d'autant au dérèglement climatique. Son cycle hydrologique dépend ensuite étroitement de l'évapotranspiration de sa canopée. « *Lorsqu'il pleut sur le paysage forestier amazonien, au moins 75 % de l'humidité est renvoyée vers la masse d'air se déplaçant vers l'ouest* », soulignaient en 2019 le biologiste américain Thomas Lovejoy et le climatologue brésilien Carlos Nobre dans une tribune alertant sur l'avenir de la grande forêt ▸

ÉPIDÉMIOLOGIE

Le paludisme suivra les précipitations

Vecteurs majeurs de maladies, les moustiques ont besoin d'eau stagnante pour se reproduire et se développer, et sont donc sensibles à la fréquence des précipitations. Leur modification aurait ainsi un impact sur la transmission des maladies vectorielles, tels la fièvre de la vallée du Rift, qui décime les troupeaux en Afrique, ou le paludisme qui a affecté 246 millions d'Africains en 2023, selon l'Organisation mondiale de la santé. Une étude menée par Alizée Chemison, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Saclay, a montré qu'un affaiblissement de l'Amoc « *pourrait atténuer l'augmentation simulée du risque de paludisme en Afrique de l'Est en raison d'un effet de refroidissement et d'assèchement. Il entraînerait également une diminution plus importante du risque de transmission du paludisme en Afrique de l'Ouest et favoriserait l'émergence du paludisme en Afrique australe, en raison d'un déplacement significatif vers le sud de la ceinture de précipitations africaine.* »



YASUYOSHI CHIBA / AFP

La modification des pluies a un impact direct sur l'incidence du paludisme (ici au Kenya en 2023).

tropicale. L'Amazonie génère environ la moitié de ses propres précipitations en recyclant l'humidité cinq à six fois lorsque les masses d'air se déplacent de l'Atlantique vers l'ouest au-dessus d'elle. « *Sur l'ensemble du bassin, l'air s'élève, se refroidit et précipite près de 20 % de l'eau des rivières mondiales dans le système fluvial amazonien* », ajoutaient les deux chercheurs.

L'humidité de l'Amazonie bénéficie à tous les pays d'Amérique du Sud, à l'exception du Chili, isolé par la cordillère des Andes. Un assèchement du nord de l'Amazonie entraînerait cette région dans un cycle de savanisation irréversible. Or, selon Thomas Lovejoy et Carlos Nobre, « *lorsque les terres sont déboisées, plus de 50 % des eaux de pluie ruissellent et ne sont pas disponibles pour être recyclées* ». L'agriculture brésilienne serait alors menacée. De même que l'alimentation de l'Union européenne, dont les terres arables occupent, en surface, moins du double de celles de ce pays, dont elle est le deuxième client en produits agricoles après la Chine. Le Brésil est en effet le deuxième exportateur mondial de produits agricoles et agroalimentaires aujourd'hui, derrière les États-Unis, avec plus de 128,8 milliards d'euros engrangés en 2022. La réduction des pluies dans le nord entraînerait par ailleurs une baisse du débit des rivières, affectant la biodiversité et les communautés humaines dépendantes de ces ressources. En 2023, la sécheresse record subie par la région a ainsi entravé la navigation des barges transportant des céréales destinées à l'exportation et isolé des villages forestiers. Une diminution durable des précipitations pourrait aussi accroître le risque d'incendies de forêt, grands émetteurs de CO_2.

Précisément, la circulation thermohaline est aujourd'hui une véritable pompe à dioxyde de carbone : environ 25 % du CO_2 émis par les activités humaines est absorbé par les eaux de surface chaque année. En se déplaçant vers l'Atlantique Nord, ces eaux se refroidissent, deviennent plus denses et plongent en profondeur, entraînant avec elles du CO_2 dissous qui peut y rester piégé pendant des siècles à des millénaires.

Le ralentissement de l'Amoc affecte l'absorption du CO_2

Ce mécanisme, appelé pompe de solubilité, contribue à réduire la concentration de ce gaz dans l'atmosphère. S'y ajoute la pompe biologique, soit la fixation du CO_2 par le phytoplancton qui, en mourant, transporte du carbone et les nutriments essentiels de la surface vers les profondeurs de l'océan. Une étude menée par Yi Liu, de l'université de Californie à Irvine (États-Unis), publiée dans *Nature Climate Change* en 2022, montre comment un ralentissement de l'Amoc et de la circulation méridienne de retournement australe — un système de courants océaniques profonds situé autour de l'Antarctique — affecte l'absorption du CO_2 par les océans, ainsi que la distribution des nutriments clés tels le nitrate et le phosphate. Lorsque ceux-ci coulent vers les abysses, la circulation profonde doit ensuite les renvoyer à la surface pour maintenir la productivité biologique. « *Nous démontrons que le ralentissement de la circulation profonde, induit par le climat, affaiblit ce flux de remontée vers*

la surface, favorisant ainsi l'accumulation progressive des nutriments dans les profondeurs de l'océan, explique Yi Liu. *Le ralentissement de la circulation diminue également le transport du CO_2 anthropique absorbé vers les profondeurs de l'océan, affaiblissant ainsi la capacité de l'océan à l'éliminer de l'atmosphère.* » Cet effet de rétroaction positive pourrait prolonger ou intensifier les conditions climatiques de réchauffement maximal sur des échelles de temps de plusieurs siècles.

Un effondrement en chaîne de la biodiversité

Le piégeage des nutriments dans les profondeurs de l'océan diminuera, au fil du temps, la biomasse disponible pour les consommateurs primaires (zooplancton, poissons, mollusques, etc.), soit principalement le phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire océanique. Ce scénario est corroboré par l'étude menée en 2020 par Lester Kwiatkowski, biochimiste marin à Sorbonne Université. Selon les modèles examinés dans cette étude, une fonte extrême du Groenland associée à une réduction des vents qui favorisent la remontée des eaux profondes limiterait effectivement les nutriments disponibles pour le phytoplancton.

La situation est tout aussi inquiétante pour la biodiversité terrestre. Une équipe de climatologues mexicains et français s'est intéressée au devenir, en cas d'effondrement de l'Amoc, des amphibiens, considérés comme des indicateurs de la santé des écosystèmes et particulièrement sensibles aux conditions climatiques nouvelles. Ils ont plus particulièrement évalué « *la distribution de 2509 espèces d'amphibiens à travers six domaines biogéographiques et différentes catégories de risque d'extinction* », mettant en évidence des réductions sévères de régions présentant à l'avenir un climat adapté à ces animaux. « *La perte d'espèces au sein des communautés régionales est étendue, touchant particulièrement les régions néotropicales, néarctiques et paléarctiques* », écrivent-ils dans *Communications Biology*. Ils se sont également penchés sur le sort de 21 146 espèces de tétrapodes et de plantes vasculaires si nous poursuivons nos émissions de gaz à effet de serre au niveau actuel jusqu'en 2100. Si rien n'est fait, cela réduira l'aire de répartition géographique de ces espèces de 28 à 48 %, et entraînera plus généralement un effondrement accéléré de la biodiversité à travers le monde. « *L'affaiblissement ou la disparition de l'Amoc va redistribuer les cartes à l'échelle de la planète* », conclut Dimitri Defrance. Pas forcément pour le meilleur. ■ **S. R.**

MICHAEL DANTAS / AFP

La sécheresse liée à la réduction des pluies dans le nord du Brésil (ici en octobre 2023 à Manaus) a entravé la navigation fluviale pour le transport des céréales et isolé les villages.

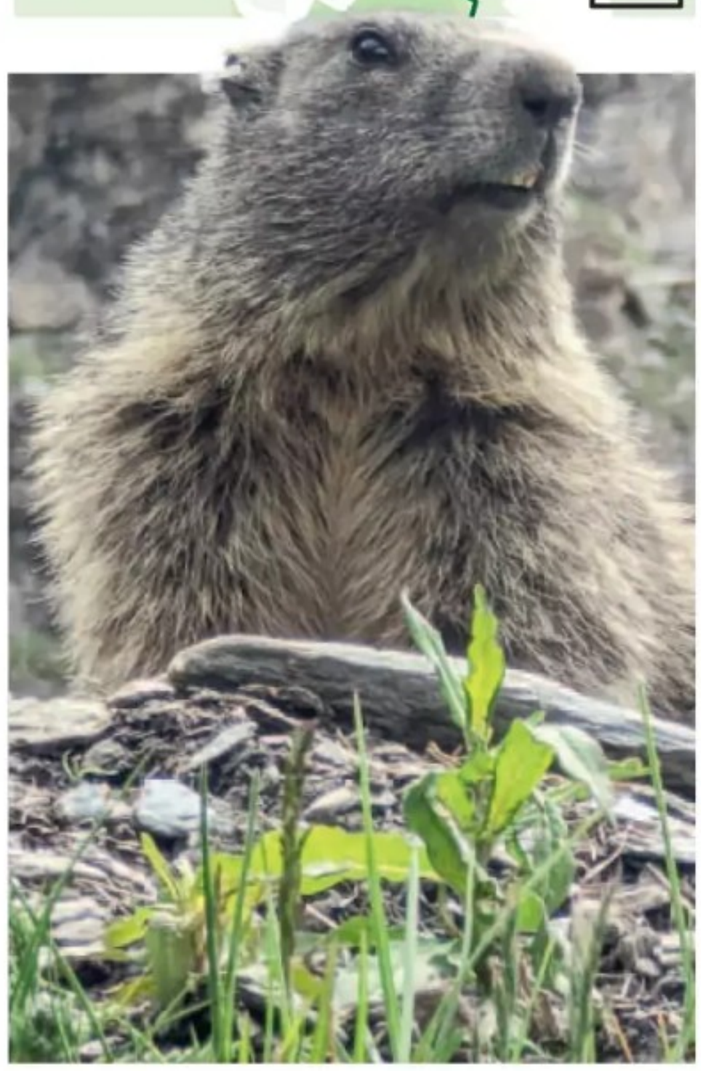
PROJECTIONS

L'autre exil climatique

D'ici à 2100, les projections du Giec estiment que la fonte du Groenland pourrait contribuer entre 5 et 33 cm à l'élévation totale du niveau des mers selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. À plus long terme, une montée progressive des eaux pouvant atteindre plusieurs mètres menacerait des villes comme New York, Londres, Shanghai, Dacca ou Amsterdam. Sachant qu'environ 50 % de la population mondiale réside à moins de 100 km des côtes, des centaines de millions de personnes seraient condamnées à l'exil. Un affaiblissement de la mousson ouest-africaine aurait le même impact.

« Au Sahel, des sécheresses à répétition dégraderaient les terres agricoles, menaçant la subsistance de ses habitants, explique le climatologue Dimitri Defrance. *Des dizaines à des centaines de millions de personnes pourraient être contraintes de se déplacer vers les villes et les régions plus humides du Sud. »* Notamment au Nigeria, le plus grand pays d'Afrique de l'Ouest, qui devrait compter plus de 400 millions d'habitants d'ici à la fin du siècle. Ces mouvements migratoires pourraient mener à une situation explosive, avec des conflits pour l'accès aux terres et aux ressources.

Le grand stress des marmottes alpines



Ces petits rongeurs au sifflement perçant sont l'emblème animal des Alpes. Mais leur monde est en pleine mutation. Le changement climatique bouleverse la démographie, la vie sociale et la physiologie des marmottes. Reportage dans les prairies verdoyantes des pentes de l'aiguille de la Grande Sassière.

La prisonnière n'est pas du tout d'accord avec son traitement. Dans le sac en toile bien serré, on devine les contours d'une petite silhouette de 40 cm, manifestement furieuse. Samuel Ginot, postdoctorant en mission de recherche dans les Alpes pour l'université de Montpellier, pose son genou sur le bout du sac qui menace de bondir, tandis qu'il prépare ses instruments de mesure. Finalement, il entrouvre le sac juste assez pour laisser apparaître une tête : celle d'une marmotte alpine femelle, toujours visiblement contrariée. Ce qui convient parfaitement au biologiste français, car il veut mesurer la force de morsure de ce rongeur d'environ 4 kg. Il place devant le museau de l'animal un mécanisme en forme de pince, dans lequel celui-ci mord avec ses dents caractéristiques. Samuel Ginot note le résultat dans son carnet : 130 newtons, soit l'équivalent de la morsure d'un renard roux — on ne plaisante pas avec ces petits animaux armés et agressifs. *« Je veux en savoir plus sur la force de morsure de ces animaux et sur le rôle qu'elle joue dans leur comportement social »*, explique le chercheur.

Grâce aux deux étiquettes accrochées aux oreilles, le chercheur reconnaît que la marmotte a déjà été identifiée et étudiée par ses collègues. C'est une femelle dominante, régnant sur un territoire et une famille. Relâché, le rongeur disparaît dans l'un des nombreux terriers nichés dans les prairies verdoyantes des pentes de l'aiguille de la Grande Sassière, à environ 2400 mètres d'altitude, dans les Alpes françaises. C'est ici, sur une superficie d'environ 2200 hectares, qu'un programme de l'université de Lyon-I étudie depuis 1990 la vie des marmottes alpines. Ces petits rongeurs au sifflement perçant sont considérés comme l'emblème animal des Alpes. Les données sur la force de morsure s'ajoutent aux informations collectées par les chercheurs lyonnais au cours de plus de trente ans de travail sur le terrain. Cela fait du programme de la Grande Sassière l'une des études les plus complètes et les plus longues sur les marmottes alpines. Il se concentre sur la dynamique des populations, l'écologie comportementale et les impacts du changement climatique. Les autres études sur le sujet sont rares et plus spécifiques.

Toutes tendent à montrer que le monde des marmottes est en pleine mutation.

Le biologiste
Samuel Ginot et Rébecca Garcia, assistante de terrain en biologie, mesurent la force de morsure d'une femelle dominante : elle équivaut à celle d'un renard roux.

Les changements climatiques réduisent les chances de survie des jeunes, provoquent des bouleversements significatifs dans les structures sociales et influencent également la physiologie des animaux.

Des reliques de l'ère glaciaire au très lent développement

Pour Christophe Bonenfant, biologiste spécialiste des populations qui dirige les recherches sur les marmottes à l'université de Lyon-I depuis 2019, *« la santé des marmottes reflète la santé des Alpes : elles sont une espèce sentinelle »*. Soit un animal dont l'état de santé sert de système d'alerte précoce pour évaluer celui d'un écosystème. Les marmottes alpines sont considérées comme des reliques de l'ère glaciaire. Leur survie dans les Alpes est due à une longue hibernation, au cours de laquelle elles vivent sur leurs réserves de graisse. *« C'est le deuxième changement climatique auquel cette espèce est confrontée. La question est de savoir si elle pourra s'adapter suffisamment vite cette fois-ci »*, déclare Christophe Bonenfant.

En raison de leur longue hibernation, les marmottes alpines se développent très lentement et n'atteignent la maturité sexuelle qu'après trois à quatre ans. Même à ce stade, beaucoup ne quittent pas immédiatement la colonie, mais restent en tant qu'« aides » auprès du couple dominant, contribuant à élever les jeunes et à augmenter la température dans le terrier grâce à leur propre chaleur corporelle pendant l'hibernation.

Les marmottes qui veulent établir leur propre territoire ont deux options : migrer pour occuper une zone inoccupée ou attaquer un voisin — parfois un parent. Le changement climatique perturbe ces mécanismes. La réduction de l'épaisseur des couches de neige rend celles-ci moins isolantes, avec pour conséquence des températures plus basses dans le terrier et une augmentation des dépenses énergétiques des marmottes. *« Elles sortent alors de l'hibernation dans un état affaibli et les femelles donnent naissance à moins de petits »*, ajoute Christophe Bonenfant.

Depuis trois heures, Aure Hirigoyen est allongée sur le ventre devant un terrier. L'étudiante en biologie appliquée doit capturer des jeunes pour des tests,

Au laboratoire improvisé dans un chalet alpin, Rébecca Garcia prépare l'examen d'une marmotte. Les données sur le rongeur sont collectées ici depuis 30 ans.

Les chances de survie des jeunes marmottes diminuent, observent les chercheurs (à droite, Aure Hirigoyen replace un marmotton dans le terrier afin qu'il puisse rejoindre sa mère).

mais la tâche est loin d'être facile. Les premiers jours après leur sortie du terrier, ceux-ci peuvent encore être attrapés à la main, mais ensuite, il faut des pièges. Aujourd'hui, trois jeunes marmottes se sont aventurées hors de leur terrier. Elle jette un sac en toile sur l'entrée pour bloquer leur retour. Deux réussissent à s'échapper, mais la troisième tombe entre les mains de l'étudiante. Pour minimiser le stress des animaux, l'examen est limité à soixante minutes. Le jeune est rapidement transporté au laboratoire, où il est anesthésié. Rébecca Garcia, assistante de terrain en biologie de l'université de Lyon-I, mesure le poids, la température corporelle et les proportions de l'animal, prélève du sang et d'autres échantillons, afin de mettre les données à jour. Le petit mammifère est ensuite identifié avec une puce électronique, et toutes les informations sont consignées dans un registre familial. « *Jusqu'à présent, nous avons étudié 2302 marmottes différentes* », précise Rébecca Garcia. Les échantillons et les données sont envoyés à l'université de Lyon-I, où Christophe Bonenfant les analyse.

Si les marmottes alpines sont encore nombreuses, avec des estimations vagues évoquant plus de 100 000 individus, les tendances sont inquiétantes : des travaux de l'université de Lyon-I montrent que la taille des portées diminue. À la Grande Sassière, une étude génétique menée en 2021 a permis d'estimer la population à plus de 4000 individus reproducteurs, contre une taille historique de près de 12 000 spécimens.

Leur disparition perturberait la chaîne alimentaire alpine

Rébecca Garcia y observe actuellement trois à quatre petits par portée, contre quatre à cinq les années précédentes, et les chances de survie des jeunes diminuent. Les études montrent que la disparition des marmottes alpines des Alpes entraînerait des conséquences graves sur l'équilibre de ces écosystèmes fragiles. Leurs vastes terriers aèrent le sol, favorisent l'infiltration de l'eau et soutiennent des communautés variées de plantes et d'invertébrés. Les marmottes jouent également un rôle clé en tant que proies pour des prédateurs comme les aigles royaux et les renards, et leur disparition pourrait perturber la chaîne alimentaire alpine.

Le changement climatique ne se contente pas de modifier le développement physique, il affecte aussi les structures sociales. Dans les familles de marmottes, les « aides » ont longtemps joué un rôle crucial. Bien que les instincts biologiques poussent les mammifères à se reproduire dès qu'ils atteignent la maturité sexuelle, ces aides restent souvent jusqu'à cinq ans dans leur famille, même si elles sont empêchées de se reproduire par le stress des combats. Lorsque les chercheurs de Lyon ont commencé le projet sur les marmottes, ils ont constaté que les portées des familles avec aides avaient un taux de survie de 80 %, contre seulement 50 % dans les familles sans aides. Mais les données recueillies à la Grande Sassière montrent que davantage de subordonnés quittent leurs groupes plus tôt. Et si les subordonnés avaient historiquement augmenté les taux de

survie des jeunes pendant l'hibernation, les tendances récentes montrent des taux désormais d'environ 50 %, avec ou sans subordonnés. C'est un cercle vicieux : des portées plus petites entraînent moins de subordonnés, réduisant la stabilité des familles et affectant encore davantage le succès reproductif futur.

Juste derrière les sommets alpins, en Italie, à moins de 20 km à vol d'oiseau du projet français sur les marmottes, se trouve le parc national du Gran Paradiso. Depuis 2006, Caterina Ferrari, écologue à l'université de Turin, y étudie aussi ces rongeurs et observe des changements similaires. La réduction des habitats et la hausse des températures entraînent des familles plus petites et des comportements modifiés. Caterina Ferrari note que la limite des arbres monte en altitude : « *Là où je mène mes recherches, il y avait encore il y a quelques années des prairies de montagne et des pâturages alpins où les marmottes étaient omniprésentes. Maintenant, il y a une forêt, et je vois les animaux se déplacer dans les buissons ou les petits arbres. Cela n'existait pas auparavant et représente un changement majeur pour une espèce si bien adaptée aux prairies ouvertes des Alpes* ». Le recul de l'agriculture alpine permet de plus aux forêts de progresser sans entrave, restreignant davantage l'habitat des marmottes et attirant de nouveaux prédateurs comme les renards.

Caterina Ferrari observe que les marmottes alpines se déplacent, cherchant refuge aussi bien à des altitudes plus élevées. « *Mais plus haut, on finit par atteindre le sommet de la montagne, où il n'y a plus que des rochers, et donc aucune possibilité de chercher de la nourriture ou de creuser des terriers* », explique-t-elle. C'est pourquoi certaines tendent à aller au contraire plus bas. Mais là, ce sont les températures élevées qui posent problème. « *C'est une espèce qui a évolué dans les zones de haute montagne. Elle ne supporte vraiment pas bien le stress thermique* », ajoute la scientifique. Avec ses collègues, elle a constaté que les marmottes restent de plus en plus longtemps dans leurs terriers pendant les journées chaudes, ce qui les empêche de se nourrir suffisamment pour constituer leurs réserves de graisse nécessaires à l'hibernation. La survie de la marmotte, symbole de la vie en montagne et du cycle des saisons, s'annonce complexe. ■

Texte et photos : Roman Goergen

« La santé des marmottes reflète la santé des Alpes : elles sont une espèce sentinelle »

Christophe Bonenfant, chercheur CNRS au Laboratoire de biométrie et biologie évolutive à l'université de Lyon-I

GÉNÉTIQUE

Des capacités d'adaptation très limitées

La question de savoir si les marmottes alpines pourront s'adapter au nouveau changement climatique reste ouverte. Markus Ralser, biochimiste spécialisé en métabolisme à l'hôpital universitaire de la Charité à Berlin (Allemagne), en doute fortement. Ses recherches montrent que les marmottes alpines possèdent l'une des plus faibles diversités génétiques parmi les mammifères, ce qui limite leur capacité d'adaptation. En outre, ces animaux restent très longtemps au sein de leur famille avant de se reproduire. « *Ils perdent leur diversité génétique plus vite qu'ils ne peuvent la reconstituer* », explique-t-il. Cela n'avait pas posé de problème jusqu'à présent, car les hautes altitudes abritaient moins de pathogènes. Mais le changement climatique pourrait briser cette barrière protectrice et rendre les marmottes vulnérables à de nouvelles menaces. « *J'ai l'impression que cela pourrait être une impasse dans leur évolution* », avertit l'expert. Et d'évoquer des scénarios comme celui qui a conduit à l'extinction du pigeon migrateur au XIXe siècle : « *Peu importe la taille de votre population, sans diversité génétique, vous êtes plus vulnérable aux nouvelles menaces imprévisibles.* »

À Marseille, la renaissance des fonds marins

Des récifs artificiels immergés dans l'anse polluée de Cortiou ont favorisé le retour de la faune sous-marine six ans après leur installation. Des projets de ce type pourraient être ainsi envisagés sur d'autres sites, même si la voie naturelle reste privilégiée.

Dans l'anse de Cortiou, au sein du Parc national des Calanques à Marseille, toute vie sous-marine avait disparu depuis des décennies. Mais aujourd'hui, on observe à nouveau oursins, crustacés et autres ascidies. Selon l'Agence de l'eau, plus de 160 espèces sous-marines seraient de retour. Ce succès a été rendu possible par un « coup de pouce à la nature » : en 2018, 36 récifs artificiels ont été immergés pour favoriser le retour de la faune aquatique. Ils sont composés de plaques en béton espacées par des parpaings pour offrir abris et cavités.

Le projet, à plus d'un million d'euros, est financé par l'Agence de l'eau et la Caisse des dépôts Biodiversité. Baptisé Rexcor, il est piloté par l'entreprise Seaboost, spécialisée dans l'ingénierie écologique en milieu aquatique. Six ans plus tard, *« les espèces sont sédentarisées et se reproduisent »*, se réjouit Julien Dalle, responsable de la restauration écologique pour Seaboost. *« Difficile de savoir avec exactitude si les espèces présentes sont celles qui peuplaient historiquement la calanque, il aurait fallu faire des prélèvements il y a 200 ans. Mais on imagine que sans la pollution subie, la biodiversité à Cortiou ressemblerait à celle des calanques voisines »*, explique Sandrine Ruitton, chercheuse à l'Institut méditerranéen d'océanologie (MIO).

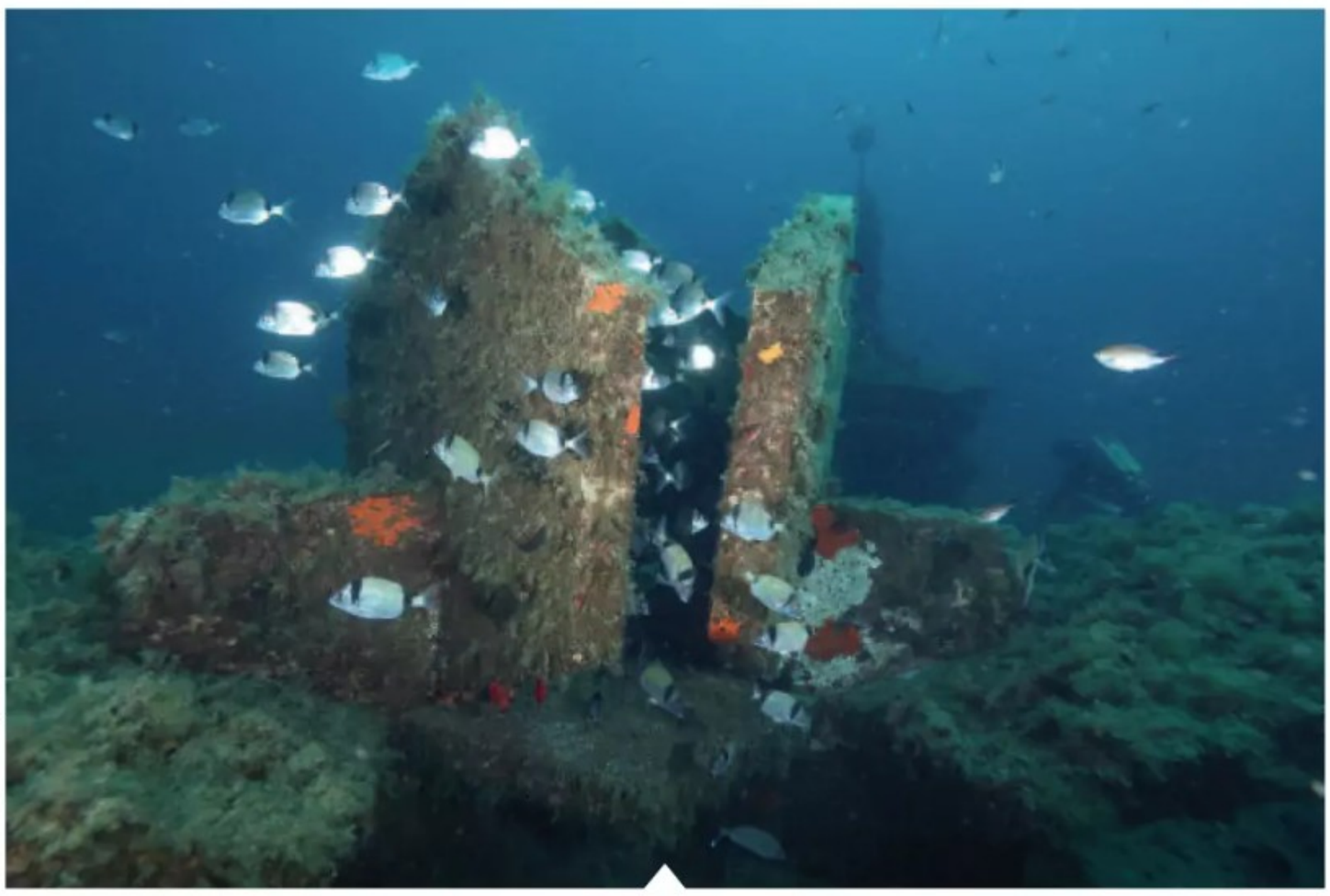
Sous son allure de carte postale, avec pins parasols et falaise calcaire, Cortiou a subi durant des siècles une pollution agressive. Au XIXe siècle, les eaux usées de Marseille se déversaient brutes dans la calanque. La situation s'est améliorée en 1987 avec la construction d'une station d'épuration qui filtre une partie des substances les plus polluantes. Mais *« le niveau de dégradation était tel que la vie sous-marine n'est pas revenue d'elle-même »*, se souvient Annick Mièvre, directrice régionale de l'Agence de l'eau. C'est pourquoi il a fallu favoriser son retour avec ces récifs artificiels, regroupés en quatre « villages à poissons ». Immergés à 18 à 25 mètres de profondeur et sur 1600 m², ils n'ont pas exactement les mêmes formes pour s'adapter à toutes les espèces. *« On imite la nature en reproduisant les habitats des petits fonds médi-*

RESSOURCES

En Asie, des récifs bâtis en fermes à poissons

Les récifs artificiels poussent partout dans le monde, notamment au Japon où ils représentent environ 20 millions de m³, contre environ 100 000 m³ en France. *« C'est colossal ! »*, lâche Sandrine Ruitton, chercheuse à l'Institut méditerranéen d'océanologie. Là-bas, les récifs servent à produire poissons, mollusques et algues pour la consommation, *« comme des terres agricoles »*. *« C'est un outil d'exploitation et non de restauration écologique mais qui permet au moins de ne pas décimer les écosystèmes. »* En Chine, les chiffres sont flous mais Sandrine Ruitton estime que les récifs artificiels s'étendent sur 60 à 100 millions de m³ pour faire face à l'épuisement des ressources provoqué par la pêche intensive. De l'autre côté de l'océan, aux États-Unis, des récifs ont été immergés pour réguler le tourisme et désengorger les sites naturels, notamment au large de la Floride, où la plongée sous-marine et la pêche sportive se pratiquent en masse.

SANDRINE RUITTON, MIO



SANDRINE RUITTON, MIO

Plus de 160 espèces sous-marines se sont installées sur les 36 récifs artificiels immergés dans la calanque de Cortiou, selon l'Agence de l'eau.

terranéens », explique Julien Dalle. Les « récifs ragues », pour les espèces cryptiques (mérous, congres, langoustes), reproduisent des failles de différents types. « *Les mérous cherchent des échappatoires alors que les langoustes des culs-de-sac. Les poulpes, eux, cherchent de très petits interstices* », détaille Julien Dalle. Les « récifs fractals », en forme de pétales, doivent fixer la « *faune qui encroûte les roches* » (anémones, algues, moules, éponges). « *L'orientation des pétales varie pour diversifier l'exposition à la lumière et au courant* », précise l'ingénieur. Les « récifs connectivité » reproduisant les herbiers et petits fonds rocheux, relient la côte aux récifs pour permettre aux juvéniles de grandir en sécurité. Enfin, le « récif 3D » contient 80 à 90 % de vide et reproduit les cavités du coralligène, habitat constitué de coraux rouges ou gorgones.

Mais malgré ce premier succès, « *on ne peut pas parler de "restauration écologique"* », pondère Sandrine Ruitton. « *La première condition aurait été d'avoir stoppé la pression responsable de la dégradation de l'écosystème. Or, les eaux sales continuent d'être déversées…* » Elles répondent certes aux normes, mais la salinité de l'eau reste localement modifiée. En plus, lors d'épisodes orageux, la station d'épuration ouvre les vannes pour ne pas déborder, rejetant ponctuellement des eaux non traitées dans la calanque.

300 tonnes de béton immergées à Cortiou

Sandrine Ruitton plonge chaque saison : pas de doute, la biomasse est là. « *Mais il faut observer la qualité de la colonisation. Or, il y a beaucoup de prédateurs comme les congres, tandis que les labridés et les gorgonaires ne sont pas revenus devant l'émissaire.* » Avoir des récifs plus ou moins près de l'émissaire permet de voir quelles sont les espèces les plus sensibles qui se tiennent à distance. « *Le projet nous apprend que même dans un environnement perturbé, on peut restaurer certaines capacités écologiques* » répond Julien Dalle, se souvenant avoir aperçu des espèces rares comme le homard et le mérou royal.

Ailleurs en France, d'autres récifs artificiels ont également été immergés. « *Nous avons eu sept fois plus de projets en cinq ans* », affirme Julien Dalle. Mais ces récifs restent des substituts, « *nous privilégions la voie naturelle autant que possible* », assure l'ingénieur. « *Les récifs artificialisent les fonds marins, il ne faut pas en abuser* », prévient aussi Sandrine Ruitton qui rappelle que 300 tonnes de béton ont été immergées à Cortiou, matière dont la fabrication implique un coût écologique élevé. Forte de ces résultats, l'Agence de l'eau dit vouloir réitérer l'opération dans d'autres lieux dépeuplés par la pollution. ■

Justine Rodier

SEABOOST

« Le projet nous apprend que même dans un environnement perturbé, on peut restaurer certaines capacités écologiques »

Julien Dalle, responsable de la restauration écologique chez Seaboost

Les États-Unis déchirés entre or noir et or vert

Le nouveau président Donald Trump va sortir les États-Unis de l'accord de Paris et promouvoir l'exploitation d'énergies fossiles. Mais il devra compter avec l'opposition de dizaines d'États fédérés, comme la Californie ou le Texas, qui entendent bien poursuivre leur ambitieuse politique de décarbonation.

Contrairement à son premier mandat en 2017 où il avait attendu six mois, Donald Trump a cette fois-ci dégainé dès son intronisation au poste de président des États-Unis, le 20 janvier 2025. Dans un an, les États-Unis auront quitté l'accord multilatéral de lutte contre le changement climatique. Pour Donald Trump et ses partisans, en effet, le changement climatique est un canular et l'accord de Paris est qualifié d'« *escroquerie injuste et unilatérale* ». Les politiques de réduction des émissions de CO_2 n'auraient d'autre but que d'affaiblir l'économie américaine pour le plus grand bénéfice de ses concurrents en général, et de la Chine en particulier. La vindicte de Donald Trump va bien au-delà de la seule sortie des énergies fossiles, puisque c'est l'ensemble des technologies à l'œuvre pour réussir cette transition énergétique qui est traité de « *nouvelle arnaque verte* » (« new green scam »). Énergies renouvelables, voitures électriques, efficience énergétique, hydrogène devraient donc au cours des quatre prochaines années ne plus être soutenus par l'administration de la Maison-Blanche. Parmi les « executive orders » signés par le président américain le 20 janvier, figure ainsi un décret sur « *l'urgence énergétique* » qui condamne les parcs éoliens *offshore* et terrestre tout en ouvrant l'exploitation pétrolière des régions auparavant protégées comme l'Alaska. Les États-Unis se marginalisent donc dans le domaine de l'éolien. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), d'ici à 2030, l'Amérique du Nord devrait stagner à 23 gigawatts (GW) d'éolien *offshore*, contre 78 GW en Europe et 126 GW en Asie.

WHITE HOUSE / PLANETPIX / SIPA

Le premier jour de son mandat, Donald Trump a signé un décret pour retirer les États-Unis de l'accord de Paris.

De plus, la réorganisation de l'administration centrale confiée à deux milliardaires, Elon Musk et Vivek Ramaswamy, pourrait toucher le financement et le périmètre d'action d'organismes comme l'Agence de protection de l'environnement ou le département de l'Énergie. La nouvelle priorité de la politique énergétique américaine, c'est l'exploitation accrue des gisements de pétrole et de gaz de schiste qui font des États-Unis le premier producteur et exportateur d'énergies fossiles.

En octobre 2024, le bureau d'études Carbon Brief a estimé que le mandat Trump pourrait provoquer l'émission de

LOREN ELLIOTT/THE NEW YORK TIMES

JIM WEST/REPORTDIGITAL-REA

Alors que le pays a entamé sa transition énergétique (le nombre de sites de production de panneaux solaires devrait ainsi doubler d'ici à 2030), le nouveau gouvernement veut développer les forages pétroliers (à droite, dans le Colorado) jusqu'en Alaska.

quatre milliards de tonnes de CO_2 supplémentaires par rapport à une politique menée par les démocrates. Quatre milliards de tonnes, c'est l'équivalent de la baisse des émissions qui serait obtenue par le déploiement des énergies renouvelables dans le monde lors de ces quatre prochaines années. La baisse continue des émissions de CO_2 des États-Unis ne serait alors plus, en 2030, que de 28 % par rapport à 2005, alors que l'administration Biden prévoyait une réduction de 50 %.

Car si les États-Unis restent actuellement responsables de 13,5 % des émissions mondiales, leurs émissions ont décru de 20 % entre 2000 et 2022. La cause principale en est la substitution du gaz de schiste au charbon pour des raisons de coût de production — une opportunité, le gaz émettant deux fois moins de CO_2 que le charbon. Mais cela tient aussi à un développement de plus en plus massif des énergies renouvelables. Aujourd'hui, 24 % de l'électricité consommée par les États-Unis provient du solaire et de l'éolien (loin derrière le gaz, cependant, qui couvre 42 % des besoins). Et ce ne serait que le début d'une croissance exponentielle. Selon l'Association américaine des industries de l'énergie solaire, « *si les États-Unis ont mis 50 ans pour arriver à 5 millions d'installations photovoltaïques actuellement, il ne faudra que six ans pour atteindre les 10 millions* ». Le nombre de sites de production solaire va doubler d'ici à 2030 et tripler d'ici à 2034. Pour la première fois en 2023, plus de la moitié des nouvelles capacités de production d'électricité est issue du solaire. Ce secteur emploie désormais 263 000 personnes dans tous les États-Unis.

La Maison-Blanche a peu de moyens de stopper cette « new green scam ». Ce sont les prix de production qui importent aux industriels. Or, ceux du solaire et de l'éolien sont plus rentables que les énergies fossiles. Alors que l'administration Trump se retire de l'accord de Paris, nombre d'États fédérés entendent bien poursuivre leur décarbonation. Réunis au sein de la Clean energy states alliance, 24 États sur 51, auxquels il faut ajouter le district de Columbia (la capitale Washington) et Porto Rico, ont adopté une stratégie ▸

Si les États-Unis restent actuellement responsables de 13,5 % des émissions mondiales de CO_2, leurs émissions ont décru de 20 % entre 2000 et 2022

pour atteindre le « zéro émission nette » de CO_2 entre 2040 et 2050.
Ce sont principalement des États gérés par des gouverneurs démocrates, mais il y a aussi des États républicains comme la Virginie, la Caroline du Nord ou le Nebraska. Porto Rico est un cas particulier. La décision d'atteindre les 100 % d'énergie renouvelable en 2050 est directement issue des enseignements tirés du cyclone Maria qui a totalement détruit l'île en septembre 2017, soulignant l'urgence climatique auprès de la population. 12 États ont par ailleurs dépassé les 50 % d'énergies renouvelables dans leur mix énergétique, principalement des États peu peuplés des grandes plaines.

L'opposition des maires des grandes villes

Outre l'engagement de ces gouverneurs, Donald Trump devra également compter sur l'opposition des maires des grandes villes américaines majoritairement démocrates. 350 édiles représentant 60 millions d'Américains ont réitéré, dès le 20 janvier, leur engagement à atteindre la neutralité carbone en 2050. « *Au contraire du gouvernement fédéral, les maires du Climate mayors* [Programme national d'action pour le climat des maires] *n'abandonneront pas leur engagement auprès de l'accord de Paris. Le coût de l'inaction est tout simplement trop élevé* », affirment les élus dans leur communiqué.
Le développement de l'éolien et du solaire est particulièrement marqué dans deux États, l'un irréductiblement démocrate, la Californie, l'autre férocement républicain, le Texas. La Californie est le premier État pour le solaire, avec une capacité installée de 20 482 mégawatts (MW) et un portefeuille de projets pour les prochaines années de 17 000 MW supplémentaires. Le solaire fournit aujourd'hui 36 % de l'électricité consommée dans cet État, qui a par ailleurs investi dans d'énormes centrales de stockage pour délivrer la production de l'après-midi pour le pic de consommation du soir. Entre 2019 et 2024, les capacités de ces batteries sont passées de 500 à 16 000 MW. La Californie planifie la construction de 52 000 MW de stockage d'ici à 2045 pour atteindre l'autonomie énergétique et un secteur électrique complètement décarboné.
Le Texas fonce, lui, sur l'éolien. L'État républicain bénéficie de vents réguliers et fréquents sur une vaste plaine appartenant à des privés attirés par des loyers alléchants. Le Texas a en effet un système de taxes très favorable aux producteurs d'énergie éolienne. Ce développement est par ailleurs supporté par des accords entre les deux grands partis parce que les parcs éoliens créent des emplois et améliorent les résultats de l'économie locale. 26 000 Texans travaillent dans des parcs qui dépassent parfois les 500 mâts. Résultat : le Texas exploite une capacité de 36 000 MW d'éolien, soit 27 % de la production totale des États-Unis.
La nouvelle politique de l'administration Trump va-t-elle combattre le « new green scam » au profit des forages pétroliers, à rebours des politiques climatiques que l'Union européenne, la Chine, l'Inde, le Brésil se sont engagés à renforcer, mais aussi de ses propres intérêts ? Les prochaines années risquent d'être schizophréniques pour l'économie américaine. ■ **Loïc Chauveau**

SPENCER PLATT/GETTY IMAGES/AFP

Le Texas, un État ayant voté massivement pour Donald Trump en 2024, s'est engagé avec force sur la voie de l'éolien, exploitant 27 % de la production nationale.

INVESTISSEMENTS

Coup d'arrêt pour les aides aux industries vertes

Parmi les décrets signés par Donald Trump, figure la suspension des subsides de l'État décidés par la loi « inflation reduction act » (IRA) votée par le Congrès en 2021. Ce texte apporte des aides substantielles aux industries dites vertes, à condition qu'au moins 55 % des composants des produits soient d'origine américaine. Cette loi protectionniste ambitionne ainsi d'accélérer la transition énergétique mais en favorisant l'emploi local. Selon le cabinet E2, l'IRA a provoqué l'émergence de 334 projets d'énergie renouvelable et d'usines de technologies propres en deux ans. Si tous ces projets se réalisent, ce sont 110 000 emplois qui seraient créés pour 126 milliards de dollars d'investissements. Les élus républicains applaudissent la suspension de l'IRA, alors que 85 % des investissements et 68 % des créations d'emplois sont réalisés dans des régions tenues par les républicains.

Cap sur les côtes albanaises

DERNIÈRES CABINES

LES CROISIÈRES DU SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

Du 5 au 14 avril 2025

VOS ACCOMPAGNATEURS SCIENCES ET AVENIR

Bruno David
Naturaliste, ancien président du Muséum national d'histoire naturelle, auteur de nombreux livres dont *Le Monde vivant* avec Guillaume Lecointre (Grasset, 2022).

Claude Sintès
Archéologue, conservateur en chef honoraire du patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS.

Philippe Chalmin
Professeur d'histoire économique à l'université Paris-Dauphine, président fondateur de CyclOpe, le principal institut de recherche européen sur les marchés des matières premières.

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef de Sciences et Avenir

2025 sera l'année de la mer, avec en point d'orgue la troisième « COP Océan » qui se tiendra à Nice en juin. Aussi, c'est en compagnie d'éminents spécialistes du monde marin que nous vous proposons de partir cette année en « Croisière du savoir ». Direction : la mer Ionienne et la mer Adriatique. Notre voyage partira d'Athènes pour arriver à Venise. Avec en point d'orgue l'Albanie. Située au carrefour des grandes voies antiques reliant l'Orient et l'Occident, sur la côte occidentale de la péninsule balkanique, l'Albanie est l'un des plus petits pays d'Europe mais qui a hérité d'un riche passé historique. Notre voyage sera l'occasion de découvrir certains de ses trésors antiques, avec des escales à proximité des sites archéologiques majeurs de Butrint, l'antique Bouthrôtos, et d'Apollonia d'Illyrie. Auparavant, nous irons à Corfou, grecque et vénitienne, et par la suite au Monténégro dans le golfe de Kotor, d'une surprenante beauté.

Mais les Croisières du savoir sont avant tout la promesse d'échanges culturels avec des experts scientifiques qui auront plaisir à partager vos émotions. À commencer par la participation exceptionnelle de Bruno David. Sa passion : les échinodermes, mais il possède une connaissance très fine de l'ensemble du monde marin. Il nous parlera des spécificités de la Méditerranée et de la biodiversité qu'elle abrite. Claude Sintès, connu pour avoir dirigé le Musée départemental Arles antique et pour ses fouilles en Lybie, est également un spécialiste de la navigation et de la piraterie dans l'Antiquité. Enfin, Philippe Chalmin, que d'aucuns surnomment le « pape des matières premières », nous racontera comment l'Adriatique a été au cœur du développement des échanges, du commerce international et du capitalisme marchand. *M.N.*

MS Hamburg

Notre croisière se déroulera à bord du « MS Hamburg », un navire à taille humaine n'accueillant pas plus de 380 passagers avec trois espaces de conférences. Il répond aux dernières exigences environnementales sur les carburants, l'échappement et le traitement des déchets. Il est exploité avec du diesel marin à faible teneur en soufre au lieu de l'huile lourde, conformément aux normes ISO actuelles et aux spécifications de MARPOL/OMI. Toutes les eaux usées sont traitées et purifiées avant d'être renvoyées hors du navire en qualité d'eau potable.

À partir de 2 490 €/pers.
en cabine intérieure occupée par 2 personnes, vols internationaux inclus

Jour	Escales	Arrivée	Départ
05/04	Paris / Athènes / Le Pirée (Grèce)	-	23h00
06/04	Nauplie (Grèce)	07h30	18h00
07/04	Katakolon (Grèce)	13h00	18h00
08/04	Corfou (Grèce)	07h00	00h00
09/04	Saranda (Albanie)	07h00	21h00
10/04	Vlore (Albanie)	07h00	23h00
11/04	Durres (Albanie)	07h00	20h00
12/04	Kotor (Montenegro)	07h00	11h30
13/04	Ancone (Italie)	09h00	20h00
14/04	Venise (Italie) / Paris	08h00	

photo : Apollonia d'Illyrie, Albanie

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :

PLEIN CAP « Croisières du Savoir »
CROISIÈRES PLEIN CAP : 251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET
info@plein-cap.com - Tél. 04 93 20 21 20

ETH ZURICH / CYBATHLON / ALESSANDRO DELLA BELLA

Victorieuse de la compétition des robots assistants du Cybathlon 2024, à Kloten (Suisse) en octobre 2024, l'équipe allemande Edan était composée du pilote Mattias Atzenhofer assisté d'un bras robotique monté sur son fauteuil roulant et doté d'une caméra.

Handicap
Une course vers l'autonomie augmentée

Plusieurs laboratoires s'affrontent chaque année au Cybathlon pour présenter des robots d'assistance à des personnes en situation de handicap dans des actions du quotidien parfois insurmontables. Les modèles innovent en faisant de plus en plus appel à l'intelligence artificielle, non sans soulever des questions éthiques. Panorama.

Par Nicolas Gutierrez C.

Tétraplégique depuis ses 14 ans à cause d'un accident de natation, Étienne Moullet, chercheur à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), participait fin 2024 au Cybathlon. Tous les quatre ans, en Suisse, cette compétition met en avant des technologies pour aider les personnes souffrant d'un handicap physique. Pour cette troisième édition, les candidats s'affrontaient au cours d'une course où ils devaient effectuer une dizaine de tâches simples (ramasser des objets, ouvrir une porte, etc.) le plus rapidement possible, assistés par des robots imaginés pour l'occasion. Étienne Moullet disposait ainsi d'un bras robotique (développé par l'entreprise canadienne Kinova) attaché à son fauteuil, qu'il contrôlait grâce à une caméra. « *La caméra permet de traquer la position de la main dans l'espace. Il commence dans une position initiale confortable et s'il bouge la main, le robot bougera dans la même direction jusqu'à ce que la main d'Étienne revienne à la position initiale,* résume Robin Gibaud, directeur de l'équipe de l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (Isir), à Paris, pour laquelle concourait Étienne Moullet. *L'objectif est de pouvoir réaliser un mouvement ample sans demander un grand déplacement de la part de l'utilisateur.* »

Si ce système est adapté aux capacités d'Étienne Moullet, il ne conviendrait pas à tous : « *J'ai la chance d'avoir une bonne mobilité des membres supérieurs, donc ça ne me pose pas trop de souci d'utiliser ma* ▶

HÔPITAL BROCA AP-HP

Mirokaï, un robot roulant au visage animé conçu par Enchanted Tools, est utilisé depuis octobre 2024 à l'Institut du cancer de Montpellier, où il accompagne les enfants dans le service de radiothérapie pédiatrique.

main pour contrôler le robot pendant quelques minutes, résume-t-il. *Mais plus la pathologie va être "lourde", plus la solution optimale devra embarquer des notions d'automatisation. À l'Inria, je travaille justement sur la détection de l'intention de saisir un objet grâce à l'IA, en analysant l'environnement pour comprendre la tâche à réaliser.* » Cette automatisation grâce à l'intelligence artificielle est précisément ce qui a donné l'avantage au vainqueur de la compétition, l'équipe de l'Institut de robotique et mécatronique du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique. Leur robot utilisait aussi un bras robotique monté sur un fauteuil roulant. Mais le robot était équipé en plus d'une caméra qui lui permettait de voir ce qui l'entourait, pour ainsi adapter son mouvement en fonction des objets avec lesquels il devait interagir. « *Si, par exemple, le robot voit une pomme, le bras s'en approche et prend l'orientation nécessaire pour que sa main puisse la saisir. L'utilisateur n'a plus qu'à valider le mouvement* », explique le directeur de l'équipe, Jörn Vogel.

L'intelligence artificielle prend le relais sur certaines actions

Leur intelligence artificielle agit à trois niveaux : d'abord un réseau neuronal détecte l'objet, un autre le localise dans l'espace pour donner sa position exacte par rapport au bras robotique, et un dernier définit comment le robot doit interagir avec l'objet. L'utilisateur garde en partie le contrôle du bras pour l'approcher de l'objet, mais une fois l'objet reconnu, l'IA peut prendre le relais. Grâce à cette collaboration humain-machine, Mattias Atzenhofer, le pilote de l'équipe, pouvait se permettre de rouler et se mouvoir plus lentement que ses concurrents,

EMILELORAUX

« La commande vocale du robot repose sur le langage naturel afin que la personne n'ait pas toute la charge cognitive »

Serena Ivaldi, directrice de l'équipe Hucebot (human-centered robotics ou robotique centrée sur l'humain), à l'Inria

tout en faisant les tâches plus rapidement et avec plus de précision. « *C'est un grand avantage de ne pas avoir à tout contrôler soi-même* », confirme-t-il.
Arrivée en troisième position, l'équipe de l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse (université qui organise le Cybathlon), a tenté d'aller plus loin… littéralement. Contrairement aux robots précédents, le leur n'est pas seulement un bras, mais bien un robot entièrement autonome, qui peut s'éloigner de l'utilisateur pour faire des tâches à distance. Il a l'allure d'un chien mécanique, avec un bras à la place de la tête. Son pilote, Sammy Kunz, contrôle ses mouvements avec des commandes vocales, et pour les mouvements plus précis il utilise une sorte de joystick-paille : en soufflant ou en aspirant, il « dit » au robot s'il doit bouger ses jambes ou son bras. Leur approche n'est pas encore au point, mais elle montre ce que pourrait être le futur des robots assistants.

Les robots ont désormais des capacités conversationnelles

Car si pas moins de six laboratoires (cinq européens et un de Hong Kong) s'affrontent au Cybathlon, c'est dans l'espoir que la compétition sera utile à toutes les personnes souffrant d'un handicap et pour lesquelles ouvrir une porte, ramasser un objet tombé par terre, vider le lave-vaisselle… sont des actions du quotidien parfois insurmontables. « *L'idée n'est pas de révolutionner le robot en tant que tel, mais plutôt les moyens de pilotage afin de proposer de nouvelles solutions aux personnes en situation de handicap* », explique Robin Gibaud.
Aujourd'hui déjà, ces robots sont une réalité. « *Ce sont principalement des bras robotiques montés sur des fauteuils roulants, qui peuvent être déjà utilisés pour faire toutes les tâches que la personne ne peut pas faire* », expose Serena Ivaldi, directrice de l'équipe Hucebot, pour human-centered robotics (robotique centrée sur l'humain), à l'Inria. Mais l'adjonction d'un robot autonome ouvre des perspectives inédites. « *Nous développons la commande vocale qui repose sur le langage naturel,* détaille Serena Ivaldi. *Le robot, doté de capteurs, de caméras, etc., voit ce qui l'entoure et traduit ces commandes en quelque chose qui a du sens selon la situation dans laquelle il se trouve. Le but est que la personne n'ait pas toute la charge cognitive.* » Alors qu'il fallait auparavant prononcer des mots-clés pour activer les actions, l'émergence de grands modèles de langage permet désormais de parler au robot naturellement. « *Le robot fait sa prédiction de ce qu'il doit faire, mais l'humain doit la valider,* prévient-elle. *Il faut être sûr que c'est exactement ce que l'utilisateur veut et que l'action soit sécurisée pour lui et son entourage.* »
L'arrivée de ces modèles de langage a aussi donné aux robots une capacité conversationnelle qu'ils n'avaient pas auparavant. Tel est le cas de certains robots assistants déjà testés à l'hôpital. Le plus récent est Mirokaï, un robot ▸

UTILISATION

L'acceptation dépend de la culture

Les robots pour le soin arrivent, mais les malades les accepteront-ils ? Cette acceptation aurait une composante culturelle importante, selon une étude de l'université Chiba, au Japon, publiée en novembre 2024 dans *Scientific Reports*. Les auteurs ont demandé à des seniors et leurs aidants au Japon, en Irlande et en Finlande, ce qu'ils pensaient de ces robots assistants.
Le pays avec la plus grande acceptation est le Japon, où près de trois participants sur quatre souhaitent les utiliser. Proportion qui chute de moitié en Finlande. Cette différence dépendrait de la culture de chaque pays : ainsi, c'est aussi au Japon que les participants déclarent être le plus habitués aux robots et en avoir une meilleure image. En France, une étude de l'hôpital Broca publiée en 2014 dans *Clinical Interventions in Aging* montre un faible intérêt pour les robots sociaux ainsi qu'une attitude plutôt négative envers ces compagnons robotiques. Mais cela pourrait changer avec les nouvelles générations : selon une étude de l'université de Lorraine présentée à la Conférence internationale de robotique sociale en 2022, les enfants apprécieraient beaucoup plus ces robots que leurs parents.

PASCAL MEUNIER

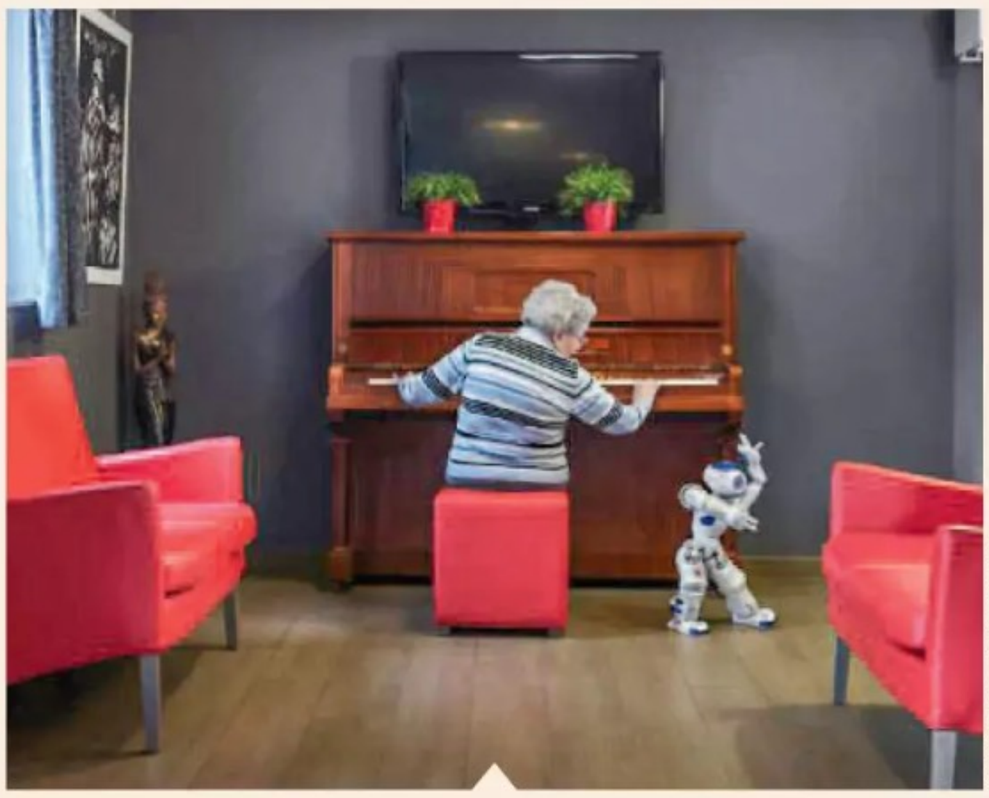
Smiby, un robot assistant (ici dans une maison de retraite), a été mis sur le marché japonais dès 2015.

ÉTHIQUE

Faut-il craindre l'utilisation des robots sociaux à l'hôpital ?

Il n'existe pour l'instant aucune réglementation sur l'utilisation de robots sociaux dans les établissements de santé, qui pose pourtant des problèmes éthiques. Parmi eux, le risque d'un trop grand attachement.

« *L'avenir des robots dans le soin est considérable, si on garde en tête que la machine n'est pas là pour remplacer les humains, mais pour améliorer leurs interactions* », pose Serge Tisseron, psychiatre et membre de l'Académie des technologies. Dans les établissements de santé, les robots sociaux sont déjà utilisés dans le cadre de thérapies non médicamenteuses, pour tester la mémoire des patients atteints de la maladie d'Alzheimer ou guider des activités d'animation. Doctorante au Sorbonne Center for Artificial Intelligence (Sorbonne Université), Meriem Beghili consacre sa thèse aux problèmes éthiques que cela pose, comme le risque d'un trop grand attachement. « *Parfois, les patients vulnérables confondent le robot avec un être vivant. Il devient alors difficile de leur faire comprendre que cette relation est unilatérale.* » Elle cite également d'autres risques, comme l'infantilisation du patient, ou les questions autour de l'autonomie et du consentement, qui n'est pas toujours formulé explicitement.



YVES GELLIE/AKG IMAGES

Outil de médiation, le robot (ici un NAO) peut poser problème s'il est confondu avec un être vivant par une personne vulnérable.

Pour le moment, il n'existe pas de réglementation sur l'utilisation de robots sociaux dans les établissements de santé. « *L'AI Act* [le cadre réglementaire européen sur l'IA adopté en 2024] *nous oblige, comme dans tout secteur, à assurer la transparence et l'utilisabilité des outils, mais ce ne sera pas suffisant* », résume Maribel Pino, psychologue et directrice du Broca Living Lab. Aussi les professionnels agissent surtout au cas par cas, que ce soit pour introduire ou retirer le robot. Pour faciliter l'intégration du robot dans la relation de soin, Maribel Pino et son équipe du Broca Living Lab produisent des recommandations éthiques. « *Dans nos pratiques, le robot garde toujours le statut d'objet médiateur,* explique la chercheuse. *On demande l'accord des résidents pour interagir avec la machine. C'est même eux qui appuient sur le bouton pour l'allumer et l'éteindre. Lorsqu'ils demandent où est NAO* [un humanoïde développé par Aldebaran Robotics], *on leur répond qu'il est rangé dans sa boîte. En général, cette réponse leur suffit et ne provoque pas d'émotion négative.* »

« *Une bonne utilisation nécessite une bonne compréhension de l'outil* », poursuit Meriem Beghili. C'est pourquoi, pour Serge Tisseron, il est indispensable de « *mettre les professionnels au cœur de la création de protocoles* ». En secondant le soignant sans l'exclure, le robot trouve sa place dans la relation de soin. « *Le robot est un très bon outil de médiation thérapeutique, mais il faut veiller à ne surtout pas l'humaniser, ni le créditer de plus de compétences qu'il n'en a* », conclut le psychiatre. Pour lui, les prochains questionnements éthiques porteront surtout sur le développement des modèles de langage de l'intelligence artificielle, qui donneront une plus grande autonomie aux robots sociaux.

Enola Tissandié

THE NATIONAL ROBOTARIUM

Ari, conçu par PAL Robotics, a été testé en 2024 à l'hôpital Broca, à Paris, pour accueillir et diriger les patients et visiteurs.

haut de 1,23 mètre développé en France par Enchanted Tools. En plus de saisir et transporter des objets, ce robot peut aussi parler avec son interlocuteur et exprimer des émotions grâce à un visage projeté. L'Isir étudie actuellement ce robot, notamment pour tenter de rendre l'interaction robot-humain le plus naturelle possible (*lire le Verbatim ci-dessous*).

Depuis octobre 2024, il est utilisé à l'Institut du cancer de Montpellier, où son rôle est d'accompagner les enfants dans le service de radiothérapie pédiatrique et de les rassurer dans leur parcours médical. Ce qui soulève une question : les patients sont-ils vraiment réconfortés par ces robots ? Des chercheurs de l'Inria et de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP) ont tenté d'y répondre, en étudiant les interactions de seniors avec un robot assistant humanoïde au sein du service de gérontologie de l'hôpital Broca, à Paris. Le robot en question s'appelle Ari, conçu par l'entreprise espagnole PAL robotics. Il peut suivre des conversations en temps réel et même s'adapter à son interlocuteur : en analysant son regard et ses expressions faciales, il peut déduire s'il est content de l'interaction ou s'il s'ennuie. Dans ce cas, il peut changer de stratégie et parler d'autre chose. Les résultats de cette expérience, mis en ligne en preprint (publication non encore validée par les pairs) en avril 2024, montrent que certains utilisateurs n'ont pas voulu interagir avec le robot, mais que la majorité l'acceptait sans problème, grâce à sa capacité conversationnelle. « *Un tel robot pourrait rendre l'attente plus simple et agréable* », affirme le directeur de l'étude, Xavier Alameda-Pineda, chercheur à l'Inria.

Les fabricants de ces robots assistants espèrent pouvoir les proposer aux seniors et aux personnes avec un handicap dans un futur proche, pour les accompagner et les aider dans les tâches du quotidien. Mais voudront-ils vraiment de cette compagnie ? Serena Ivaldi en est certaine : « *Je pense que si cette technologie parvient à leur redonner de l'autonomie, elle sera acceptée.* » ■

CATHERINE PELACHAUD

VERBATIM

CATHERINE PELACHAUD

DIRECTRICE DE RECHERCHE À L'INSTITUT DES SYSTÈMES INTELLIGENTS ET DE ROBOTIQUE (ISIR)

« Les participants préfèrent dialoguer avec un robot qui s'adapte »

“Nous voulons améliorer les interactions humain-machine, notamment avec les robots sociaux humanoïdes. Notre but est d'aider le robot à s'adapter au comportement de l'humain. Pour cela, nous avons développé des modèles pour que les robots puissent comprendre la communication verbale et non verbale de leur interlocuteur et ainsi s'adapter à la personne qui est en face. L'intérêt de cette adaptabilité a été testé dans le cadre d'entretiens motivationnels, où le robot prend la place d'un thérapeute qui aide des personnes désirant changer de comportement, par exemple arrêter de fumer ou faire plus de sport. Ces thérapies sont un bon test, car pour leur réussite, il est essentiel que le patient se sente écouté et soit à l'aise avec l'interaction. Nos résultats confirment que les participants préfèrent en effet dialoguer avec un robot dont les comportements s'adaptent à son interlocuteur, et montrent comment on peut améliorer cette interaction.”

Comment les larmes réduisent l'agressivité des hommes

En plus d'une fonction biologique de lubrification de l'œil humain, les larmes auraient d'autres pouvoirs. Ainsi, celles des femmes réduiraient l'agressivité des hommes ! Des chercheurs ont montré qu'elles contiennent des substances chimiques qui apaisent le comportement violent.

Et si les larmes pouvaient réduire l'agressivité ? Voilà la question que se sont posée des neurobiologistes de l'institut Weizmann de Rehovot, en Israël, fin 2023. Chez l'humain, on différencie trois types de larmes : réflexes (qui servent à éliminer les substances nuisibles comme la fumée), basales (qui lubrifient l'œil, comme Charles Darwin le mentionnait) et émotionnelles (celles liées à la tristesse ou la joie). C'est à ces dernières, caractérisées par une forte teneur en protéines, hormones et toxines que se sont intéressés les chercheurs israéliens.

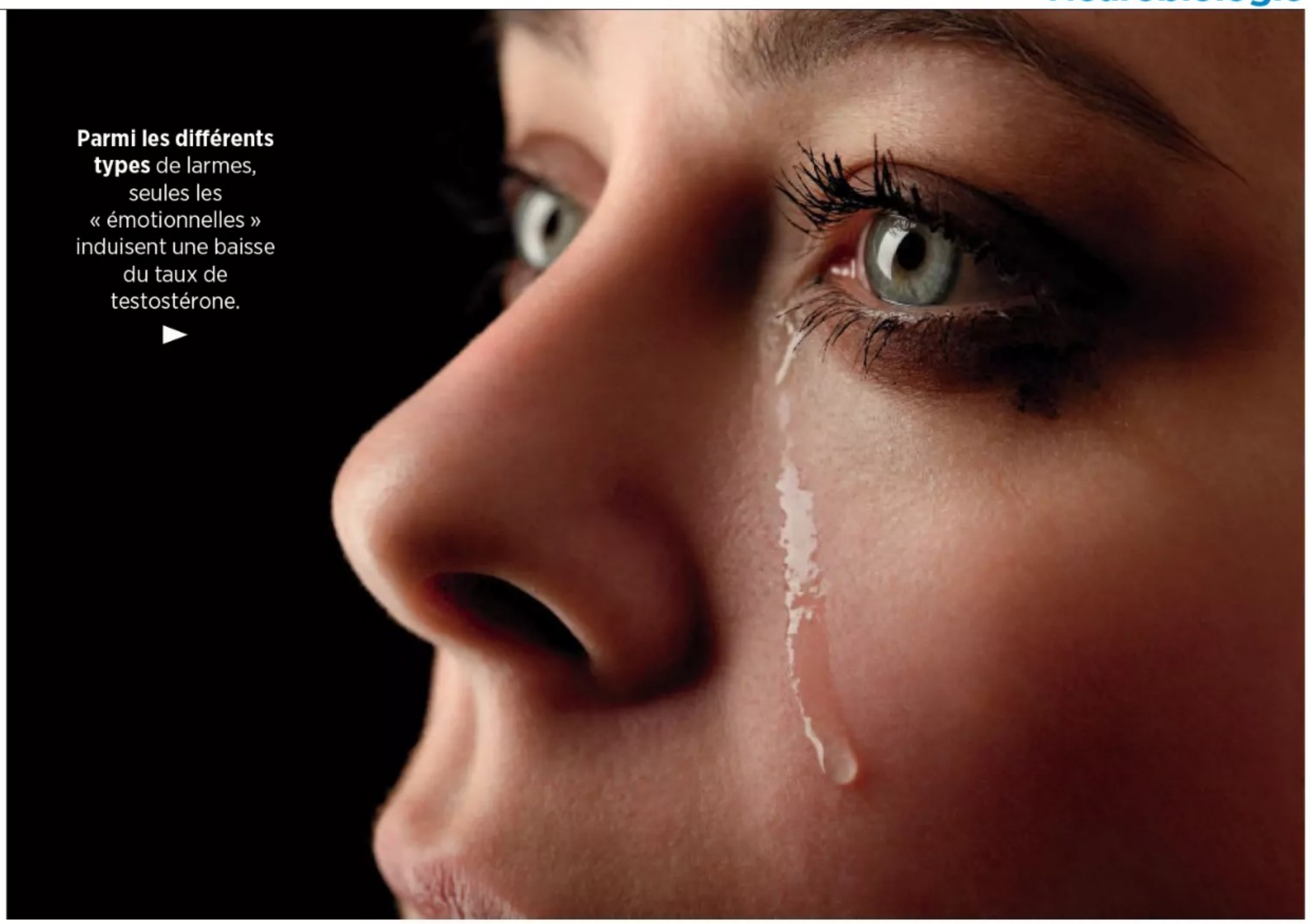
En 2011 déjà, ils avaient montré dans la revue *Science* que ce type de larmes féminines pouvait induire une baisse du taux de testostérone chez les hommes. Pour en savoir plus sur leur possible impact sur l'agressivité, ils ont invité des femmes à visionner des films tristes afin de collecter leurs larmes dans des petits tubes à essai. Ils ont ensuite demandé à un groupe de 31 hommes de humer ces tubes à essai, leur faisant croire qu'ils étudiaient les odeurs subliminales. Parallèlement, un autre groupe témoin reniflait de l'eau salée. Tous devaient ensuite participer à des jeux impliquant des échanges monétaires au cours desquels les chercheurs ont observé que plus on retirait d'argent à un participant, plus son comportement devenait agressif. Or, selon les résultats parus dans *Plos Biology*, les hommes qui avaient humé les larmes des femmes se montraient 44 % moins agressifs que les autres !

Des récepteurs olfactifs réagissent au liquide lacrymal

Afin d'identifier une éventuelle substance calmante, les chercheurs ont ensuite versé du liquide lacrymal sur différentes cellules en culture. Ils ont alors observé que quatre récepteurs olfactifs réagissent à la présence des larmes, bien que ces dernières soient inodores. Cela laisse supposer qu'un ou plusieurs composés chimiques présents dans ce liquide lacrymal influencent les récepteurs des odeurs dans le nez des hommes. *« C'est le résultat qui m'a surpris le plus »*, confie Noam Sobel. Jusqu'à présent, aucun n'a pu être isolé.

Une fois les récepteurs olfactifs activés, comment l'information est-elle traitée dans le cerveau ? Pour le comprendre, les chercheurs ont analysé le cerveau des hommes avec l'aide d'un scanner IRM pendant qu'ils sentaient les larmes. Ils se sont aperçus alors que deux zones connues pour être impliquées dans les comportements agressifs se mettaient à communiquer : l'insula antérieure et l'amygdale. Or, plus elles communiquaient, moins les joueurs cherchaient à se venger de leurs pertes.

« Ces résultats suggèrent que les larmes sont une couverture chimique offrant une protection contre l'agression, commente Noam Sobel, directeur de l'étude. *De plus, cet effet est commun aux rongeurs et aux humains, et peut-être aussi à d'autres mammifères. »* En effet, de nombreuses études, principalement sur des rongeurs, avaient déjà montré que les larmes d'autres mammifères contiennent des substances chimiques qui servent de signaux sociaux et peuvent réduire l'agressivité. Dès 1997, l'équipe de Joseph Terkel de l'université de Tel-Aviv (Israël) avait ainsi découvert que les mâles subordonnés de rats-taupes (*Spalacinae*), aveugles, s'enduisent de larmes pour apaiser le comportement



Parmi les différents types de larmes, seules les « émotionnelles » induisent une baisse du taux de testostérone. ►

CHEPKO / GETTYIMAGES

agressif du mâle dominant à leur égard. En 2020, l'équipe de Roberto Tirindelli, de l'université de Parme (Italie), avait quant à elle prouvé que les larmes des souris femelles contiennent des produits chimiques empêchant les souris mâles de se battre. Chez cette espèce de rongeur, les composés volatils des larmes se fixent sur une partie du nez appelée « organe voméronasal » que l'être humain a perdu au cours de son évolution. Néanmoins, il semble que cet organe ait été remplacé par le nez lui-même, du moins en ce qui concerne la perception des molécules contenues dans les pleurs.

Aucune étude disponible sur les larmes masculines

Reste une autre question : les larmes masculines ont-elles le même pouvoir apaisant que les féminines ? Rien n'est moins sûr car il arrive qu'une même molécule chimique génère un comportement diamétralement opposé selon les sexes. Lors d'une précédente étude publiée dans *Science Advances* en novembre 2021, l'équipe israélienne s'était penchée sur l'hexadécanal, une substance chimique produite par certaines parties du corps et qui abonde chez les bébés. Ils avaient alors noté que renifler cette substance réduisait l'agressivité chez les hommes alors qu'elle avait l'effet inverse chez les femmes. Une hypothèse est qu'il s'agirait d'un mécanisme de survie incitant les pères à ne pas attaquer leur bébé et les mères à le défendre. Mais pour les larmes masculines, impossible de répondre… faute de participants aux études ! « *Nous recherchons des individus qui pleurent facilement,* explique Noam Sobel. *Or, pour 100 femmes volontaires, seul un homme se présente.* » En attendant, l'équipe va s'intéresser aux pleurs d'enfants de 2 ans. « *À cet âge, nous pourrons avoir autant de larmes masculines que féminines !* » ■

Aurore Braconnier

COMPORTEMENT

Pour évacuer la colère, oubliez le jogging !

Comment évacuer la colère ? En avril 2024, des chercheurs de l'université d'État de l'Ohio (États-Unis) ont analysé plus de 150 études impliquant plus de 10 000 participants. Conclusion : les techniques diminuant l'excitation comme la respiration, la méditation ou le yoga sont les meilleures pour réduire l'agressivité. En revanche, les activités augmentant l'excitation sont globalement peu efficaces. ***« J'ai été étonnée par le fort impact négatif du jogging sur la colère***, confie Sophie Kjaervik, qui a dirigé la recherche. ***Si nous nous attendions à ce que les activités qui élèvent la fréquence cardiaque ne réduisent pas la colère, observer une augmentation est une surprise. »***

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS SCIENCES ET AVENIR

DE LA PRÉVENTION AUX SOINS

Le guide de la santé

Alimentation • Sommeil
Activité physique • Dépistage
Télémédecine • Automédication
Bilans • Vaccins...

ARNAUD MEYER/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

« Les progrès de la médecine ne cessent de s'accélérer. Nous vivons une révolution qui donne le vertige »

Jean-Pierre Thierry, médecin de santé publique

SE SOIGNER : LES BONS RÉFLEXES À TOUS LES ÂGES

en vente en kiosque

Vitiligo, l'espoir d'une peau repigmentée

Cette maladie auto-immune se manifeste par des taches de dépigmentation sur le corps. Une affection souvent stigmatisante et mal prise en charge par la médecine. Une nouvelle molécule permet aux mélanocytes de recoloniser la peau et de la recolorer. Explications.

« *Certaines personnes ont la peau noire, d'autres la peau métissée, moi j'ai les deux.* » C'est avec un courage inédit que la mannequin canadienne Winnie Harlow lutte pour l'intégration des patients atteints de vitiligo. Cette maladie auto-immune dermatologique définie par des taches de dépigmentation de la peau (et parfois aussi des poils) n'est pourtant pas rare puisqu'elle concerne 1 à 2 % de la population générale. Mais elle demeure stigmatisante. « *Si la maladie n'engage pas le pronostic vital, elle n'en reste pas moins lourde de conséquences sur la qualité de vie de celles et ceux qui en souffrent* », rappelait en juin 2024 dans une tribune l'Association française du vitiligo*. « *En Inde, il s'agit d'un obstacle quasi absolu au mariage et, dans certains pays du Moyen-Orient, parfois, d'une cause de répudiation* », précise le Pr Thierry Passeron, chef de service de dermatologie au CHU de Nice, l'un des trois centres experts en France avec Bordeaux et Créteil. Mais, bonne nouvelle, dans cette affection complexe à la croisée de la génétique et de l'environnement, les connaissances ont récemment fait des pas de géant et une véritable révolution thérapeutique est en cours. « *La prise en charge est en train d'évoluer et le discours médical va pouvoir enfin changer* », insiste le Pr Julien Seneschal, chef du service dermatologie au CHU de Bordeaux.

Une multitude d'idées reçues sur la maladie

Pendant trop longtemps, les malades désemparés par leurs dépigmentations — pouvant toucher n'importe quelle zone du corps (visage, mains, pieds, troncs, organes génitaux…) — se sont entendu répondre par les médecins que, non, il n'y avait rien à faire, qu'il fallait surtout éviter le soleil (faux, c'est un allié) et que tout cela était finalement psychosomatique, « dans la tête ». Sans oublier la crainte (totalement erro-

DOMINIC LIPINSKI/PA WIRE/ABACA

La mannequin canadienne Winnie Harlow, atteinte de vitiligo, lors d'un défilé à Londres (Royaume-Uni) en 2014.

1 à 2 % Le risque en population générale. 3 % si l'un des deux parents est atteint, 8 % si les deux le sont.

80 % des cas surviennent avant 30 ans.

De 6 et 24 mois
Le délai pour repigmenter la peau.

née) d'une contagiosité. Autant d'idées reçues conduisant à une prise en charge plus qu'insuffisante, comme l'a pointé en 2023 une étude pilotée par le Pr Khaled Ezzedine, dermatologue à l'hôpital Henri-Mondor (Créteil) : aucun traitement n'avait été proposé à plus de 80 % des patients interrogés.

Aujourd'hui, on sait que la maladie est en lien avec un dysfonctionnement du système immunitaire, aboutissant à la perte des mélanocytes, les cellules qui produisent la mélanine, le pigment naturel de la peau *(voir l'infographie)*. Bien qu'une cinquantaine de gènes (HLA, CTLA4, NLRP1, TYR…) soient associés au vitiligo, la maladie n'est pas héréditaire. *« Chez les personnes présentant une prédisposition génétique, différents facteurs peuvent déclencher le processus auto-immun de destruction des mélanocytes et tous sont liés à l'exposome, c'est-à-dire à l'ensemble des expositions auquel notre organisme est soumis tout au long de sa vie »*, détaille Thierry Passeron. Soit un « stress » au sens médical du terme. Et la liste est longue : une chirurgie, une infection, des changements hormonaux (grossesse, puberté, ménopause), un stress psychologique, des frictions répétées, une brûlure comme un coup de soleil, un contact avec des produits chimiques… Le facteur déclenchant n'est cependant pas toujours identifié et la prise en charge thérapeutique ne permet pas d'améliorer le vitiligo ou d'éviter sa progression. Le plus souvent (90 % des cas), la maladie est dite non segmentaire : toutes les zones du corps peuvent être touchées de manière symétrique. Si tout commence par une tache blanche, l'évolution se fait ensuite sur un mode imprévisible : la tache peut rester stable, s'étendre plus ou moins rapidement, ou régresser. Parfois le vitiligo est dit actif, c'est-à-dire en phase de poussée. De petits signes sont alors présents, comme une dépigmentation dite en confetti, des bordures claires non dépigmentées. Invisibles à l'œil nu, ils ne seront repérés que sous lumière ultraviolette, celle de la lampe de Wood.

Qu'une seule zone ou plusieurs soient dépigmentées, différentes options thérapeutiques sont envisageables : immunomodulateurs, cortisone, photothérapie (soleil ou rayons UVB chez un dermatologue, mais pas les UVA de l'esthétique). Dans de rares cas, les médecins peuvent proposer une greffe de mélanocytes. Celle-ci concerne moins de 100 patients par an en France *(lire l'encadré ci-dessous)*. En tout cas, *« plus le vitiligo est actif ou d'apparition récente, plus il doit être traité rapidement,* poursuit Thierry Passeron. *Avec trois objectifs : bloquer la dépigmentation, induire la repigmentation et tenter de prévenir les récidives qui surviennent dans environ 50 % des cas. »*

Une nouvelle molécule réactive les mélanocytes de la peau

Depuis un peu plus d'un an, une nouvelle arme est disponible : le premier traitement spécifique du vitiligo, le ruloxitinib, commercialisé par le laboratoire Incyte Biosciences sous le nom d'Opzelura. Le tube de 100 g, d'un prix de 838 euros, est remboursé à hauteur de 65 % par la Sécurité sociale depuis l'été 2024. Il permet de traiter l'équivalent de la surface d'une main, soit 1 % de la surface corporelle, pendant six mois. Mais son application est contraignante : deux fois par jour en couches fines. Aussi demeure-t-il réservé aux formes peu étendues. *« Il est proposé dès l'âge de 12 ans aux patients dont la zone à traiter ne dépasse pas 10 % de la surface corporelle totale, soit environ 30 à 40 % de la totalité des patients »*, détaille Julien Seneschal. Cette molécule innovante, récom-

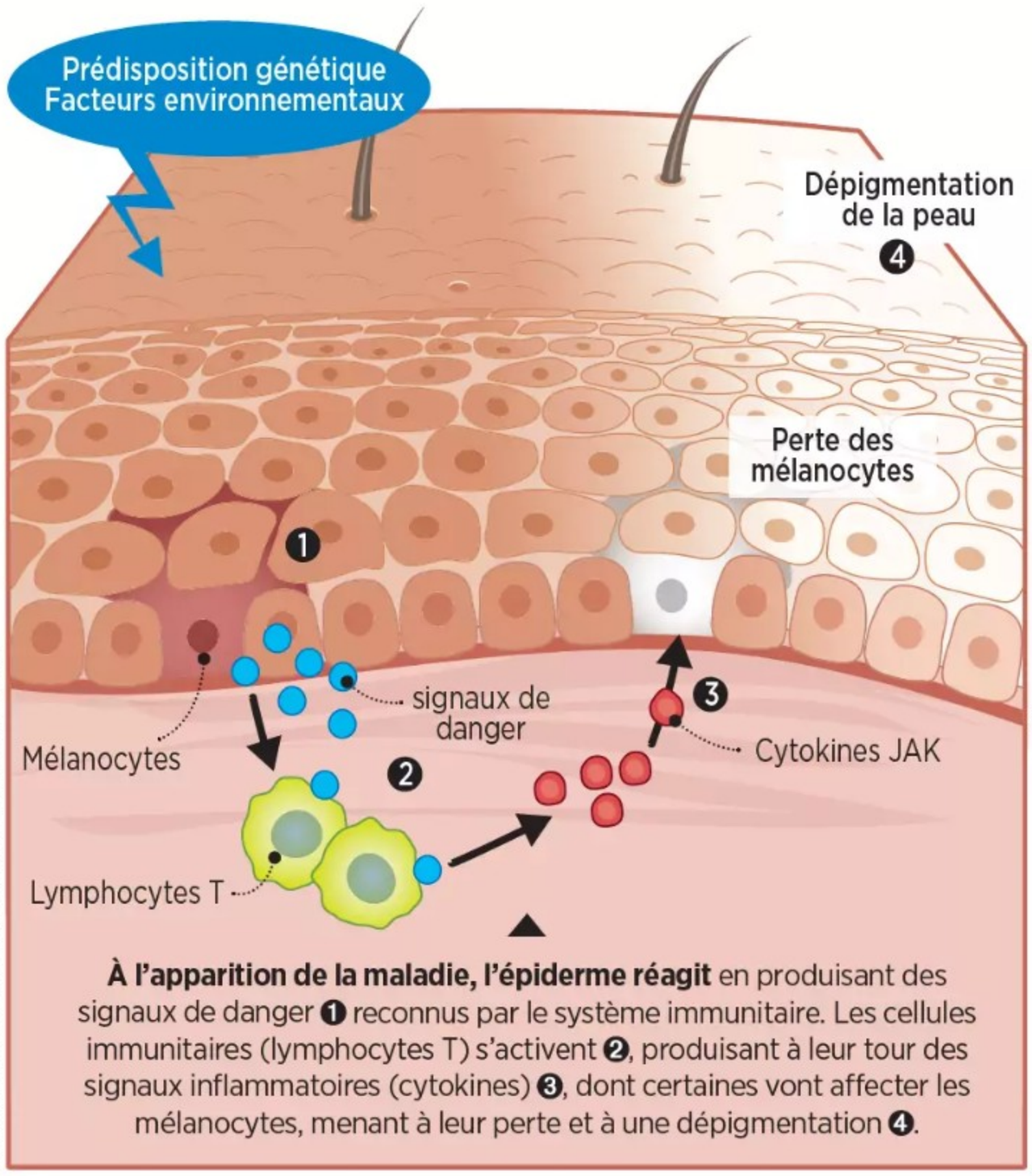
CHIRURGIE

L'autogreffe de mélanocytes sous anesthésie locale

CHU BORDEAUX

Réservée aux patients présentant un vitiligo dit stable (pas de signes visibles en ultraviolet), localisé (peu de zones) et après échec des traitements médicaux, l'autogreffe de mélanocytes est réalisée sous anesthésie locale d'une durée d'environ trois heures. Elle commence par une biopsie de peau sur une zone saine pigmentée peu visible (cuir chevelu, pubis, fesse). Un traitement chimique permet ensuite de séparer la partie du derme de l'épiderme pour ne récolter que la couche épidermique. La solution obtenue est appliquée sur la zone de peau receveuse *(photo)* préalablement débarrassée de sa couche superficielle par exposition à un laser. Un pansement est posé pendant environ huit jours, mais le patient devra encore attendre près de neuf mois pour évaluer le succès de l'opération.

Les mécanismes conduisant au vitiligo



BRUNO BOURGEOIS ; SOURCE : ASSOCIATION FRANÇAISE DU VITILIGO

À l'apparition de la maladie, l'épiderme réagit en produisant des signaux de danger ❶ reconnus par le système immunitaire. Les cellules immunitaires (lymphocytes T) s'activent ❷, produisant à leur tour des signaux inflammatoires (cytokines) ❸, dont certaines vont affecter les mélanocytes, menant à leur perte et à une dépigmentation ❹.

pensée fin décembre 2024 par le prix Galien 2024, permet aux mélanocytes de recoloniser la peau et de la recolorer. Il correspond au premier traitement dit anti-JAK. Pourquoi un tel nom ? Parce que dans les mécanismes de dépigmentation à l'œuvre dans la maladie, les mélanocytes sont détruits par certaines cellules du système immunitaire, les lymphocytes T, selon des voies biologiques activées par des protéines comme celles appelées Janus kinases (JAK 1, 2, 3). Or, c'est justement l'action de ces protéines qui est inhibée par le ruxolitinib. Résultat : une réduction de l'agressivité des lymphocytes et des mélanocytes qui repeuplent la peau atteinte. Très bien supporté, ce traitement est un véritable progrès de l'avis des spécialistes, qui le prescrivent depuis maintenant plusieurs années dans des essais.

VITILIGO BORDEAUX

« La prise en charge est en train d'évoluer et le discours médical va pouvoir enfin changer »

Pr Julien Seneschal, chef du service dermatologie au CHU de Bordeaux

S'il permet d'obtenir en moyenne 75 % de repigmentation pour le visage chez un patient sur deux, ses résultats ne s'observent qu'après de longs mois de traitement, au moins six et souvent jusqu'à vingt-quatre mois. De plus, *« les mains, les pieds et les poignets répondent moins bien que le visage »*, ajoute Thierry Passeron. D'autres essais sont menés pour améliorer ces résultats. *« Les retours d'expérience actuels suggèrent qu'ils sont meilleurs si on associe des séances d'UVB ainsi qu'une prise orale de certains antioxydants,* poursuit le spécialiste niçois. *Ce qui permet finalement de repigmenter les lésions bien plus rapidement. »* Des résultats qui restent en attente de confirmation et de publication. Le recul sur l'usage des UVB a en tout cas permis de montrer que le risque de développer un cancer cutané (mélanomes et autres types) est moindre chez les patients atteints de vitiligo que dans la population générale.

D'autres voies biologiques sont en cours d'étude

D'autres molécules, des anti-JAK administrées par voie orale et destinées à des vitiligos très étendus ou très actifs, sont en cours de développement dans des essais de phase 3. Elles pourraient arriver sur le marché à l'horizon 2030. Parallèlement, les chercheurs explorent d'autres voies biologiques et types de molécules. Comme celles permettant d'accroître l'effet des UV ou celles agissant sur les lymphocytes, qui régulent ceux qui détruisent les mélanocytes. Enfin, dernier axe de recherche très prometteur, la voie de signalisation Wnt. *« Elle semble essentielle dans la multiplication et la survie des précurseurs des mélanocytes, les cellules souches mélanocytaires »*, détaille le Thierry Passeron. D'où l'idée de parvenir un jour à la stimuler avec un traitement local favorisant la repigmentation des zones qui répondent encore mal aux traitements, notamment les mains et les pieds. ■ **Sylvie Riou-Milliot**

• www.afvitiligo.com

Le quinoa, une petite graine pleine d'atouts

Cette pseudo-céréale est plus riche en acides aminés essentiels et en minéraux que le riz ou le blé. Sa consommation aide également à réduire le taux de mauvais cholestérol.

Rouge, noir ou doré… Le quinoa est une **pseudo-céréale** de la famille des *Amaranthaceae*, cousine de la betterave et des épinards. Cultivée historiquement sur les hauts plateaux des Andes, cette petite graine ronde millénaire s'est installée aujourd'hui dans diverses régions du monde (Espagne, Afrique du Nord, Chine, etc.) dont la France, sur les terres de l'Anjou, de la Mayenne et du Poitou. Résistant à la sécheresse, le quinoa peut être une alternative aux céréales traditionnelles (blé, maïs, etc.) face au changement climatique. D'autant plus que, sans gluten et pourvu de nombreux minéraux et vitamines, il est très apprécié pour ses qualités nutritionnelles.

Une source de protéines

100 g cuits apportent 5 g de protéines. C'est plus que du riz complet (3,4 g/100 g) ou de l'orge perlée (2,4 g/100 g) (1). Le quinoa est intéressant pour les personnes qui ne consomment pas de protéines animales. Il fournit en effet les neuf acides aminés essentiels que l'organisme ne sait pas synthétiser mais dont il a besoin pour le développement musculaire et le renouvellement cellulaire. Les céréales (riz, orge, blé, etc.), elles, apportent géné-

230 000 tonnes
de quinoa sont produites chaque année dans le monde. Avec 4000 tonnes par an, la France est le premier producteur européen de quinoa.
(SOURCE : INTERCÉRÉALES.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

PSEUDO-CÉRÉALE Plante dicotylédone qui n'appartient pas à la famille des graminées comme le blé, mais dont on utilise les grains de la même manière qu'une céréale. On compte parmi elles le sarrasin et l'amarante.

SAPONINES Molécules détergentes et émulsifiantes naturellement produites par certaines plantes pour se protéger des prédateurs et des nuisibles (insectes, oiseaux, etc.).

MALADIE CŒLIAQUE Maladie auto-immune liée à l'ingestion de gluten, contenu dans certaines céréales (blé, orge, seigle) et survenant chez des individus prédisposés génétiquement. Elle provoque une inflammation et des lésions de la paroi de l'intestin.

ralement huit acides aminés et doivent pour cette raison être associées à des légumes secs (haricots, lentilles, etc.) pour compléter l'acide aminé manquant, la lysine. Toutefois, la teneur en protéines d'une portion de quinoa reste insuffisante pour remplacer dans sa totalité une portion de viande ou de poisson, 100 g de poulet apportant par exemple, 29 g de protéines.

Il contient plus de minéraux que les céréales

Le quinoa fournit divers minéraux et oligo-éléments en quantités plus intéressantes que les céréales comme le blé ou le riz, même complets. Il fournit des vitamines du groupe B, notamment B6 et B9 (50 microgrammes/100 g quinoa cuit contre 29 µg/100 g de riz complet cuit). Le quinoa apporte du phosphore (180 mg/100 g), du potassium (220 mg/100 g contre 43 mg/100 g de riz complet) qui aide à réguler la pression artérielle et l'influx nerveux, ainsi que de petites quantités de calcium (23 mg/100 g). Cent grammes renferment aussi jusqu'à 2 mg de fer non héminique, à associer à une source de vitamine C pour favoriser son assimilation par l'organisme.

Sa teneur en antioxydants varie selon le grain

Le quinoa fournit aussi de la vitamine E (0,9 mg/100 g), du sélénium, du zinc (1,5 mg/100 g), qui intervient notamment dans la cicatrisation des plaies, du cuivre (0,21 mg/100 g), également nécessaire à la formation de l'hémoglobine, et du collagène, ainsi que du magnésium (71 mg/100 g), capital pour le bon fonctionnement du système immunitaire.

Le quinoa est également riche en composés phénoliques (acide gallique, acide férulique, etc.) et en flavonoïdes (rutine, kaempférol, quercétine) dont les teneurs varient selon la couleur des grains. Ainsi les quinoas noir et rouge renferment des teneurs bien plus élevées en acide férulique que le blanc. De même, les quantités de bétanine, un pigment coloré, sont environ 2,5 fois plus élevées dans les grains noirs que dans les rouges (2).

Il a des propriétés anticholestérol

La graine de quinoa contient 118 mg/100 g de phytostérols (β-sitostérol, campestérol et stigmastérol), des composés lipophiles dont la structure est identique à celle du cholestérol. Après la dégradation des phytostérols dans l'intestin grêle, ils remplacent le cholestérol dans les micelles et réduisent ainsi la production de lipoprotéines de basse densité (LDL) dans l'intestin et le foie pour finalement réduire le cholestérol sérique dans l'organisme. En plus de leur effet hypocholestérolémiant, les phytostérols auraient aussi des propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes (3).

Le rincer avant emploi

Sa teneur en fibres (près de 4 g/100 g) lui permet de réguler le transit intestinal et limiter le temps de passage des toxines dans l'intestin. Avec près de 150 kcal aux 100 g et 28 g de glucides, le quinoa cuit apporte presque autant d'énergie que les pâtes ou le riz. L'enveloppe de la graine de quinoa renferme plus de 85 % de **saponines**, qui possèdent des propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires, mais elles confèrent un goût amer aux graines. Il vaut donc mieux les rincer afin de les éliminer (4). ■ **Sylvie Boistard**

MARIE-LAURE ANDRÉ Diététicienne-nutritionniste à Hyères (Var)

Un aliment sans gluten

« L'index glycémique (IG) du quinoa est relativement bas (35) par rapport à celui de céréales comme le riz complet (50). Cela signifie que sa consommation a peu d'effet sur la glycémie et évite un pic d'insuline important après un repas. Le quinoa ne contient pas de gluten, il peut donc être consommé sans problème par les personnes sensibles à cette protéine et celles atteintes de la **maladie cœliaque**. »

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) Metabolomics analysis reveals the accumulation patterns of flavonoids and phenolic acids in quinoa grains of different colors, Qian G. et al, *Food Chemistry : X*, 2023.

(3) Nutritional and functional new perspectives and potential health benefits of quinoa and chia seeds, Agarwal A. et al, *Antioxidants*, 2023.

(4) Research progress of quinoa seeds (Chenopodium quinoa Wild.) : Nutritional components, technological treatment and application, Mu H. et al, *Foods*, 2023.

JIMMY CHIN - PHOTO12

Dans la chaussure retrouvée en septembre 2024 sur la face nord de l'Everest, montagne identifiée comme le plus haut sommet du monde dans la chaîne de l'Himalaya, une chaussette porte le nom d'Andrew Irvine (en médaillon), disparu le 8 juin 1924.

Everest

Une découverte relance l'énigme de sa conquête

Cent ans après la disparition de George Mallory et Andrew Irvine sur les pentes de l'Everest, la chaussure de ce dernier vient de refaire surface et, avec elle, un des plus grands mystères de l'alpinisme : que s'est-il passé le 8 juin 1924 ? Embarquez pour une expédition historique.

Par Marie Parra

Le 7 juin 1924. Journal de bord d'Andrew Irvine, page 98. « *J'ai préparé deux appareils à oxygène pour notre dernière tentative de demain.* » Le jeune alpiniste n'atteindra jamais la centième page de son carnet en cuir. Le lendemain, il se lance dans la périlleuse ascension du sommet de l'Everest avec son compagnon de cordée, le célèbre George Mallory. Une expédition que personne jusqu'alors n'avait réussie et qui leur sera fatale. Le corps de George Mallory ne fut retrouvé qu'en 1999, mais toujours aucune trace d'Andrew Irvine. Ce n'est qu'en septembre 2024, exactement cent ans après leur disparition, qu'une équipe du National Geographic fait une découverte retentissante : les restes d'un pied de l'alpiniste dont la chaussette est étiquetée « *A. C. IRVINE* ».

C'est tout à fait par hasard que le réalisateur Jimmy Chin et son équipe tombent sur cette chaussure. Leur objectif était de grimper l'Everest par la face nord, et de redescendre de l'autre côté à ski. Pendant leur ascension, ils aperçoivent une semelle parsemée de clous en acier qui leur rappelle immédiatement celle de George Mallory. En s'approchant, Jimmy Chin remarque qu'une chaussette est toujours coincée à l'intérieur, ainsi que les restes d'un pied. En soulevant celle-ci, il révèle l'étiquette brodée au fil rouge, indiquant le nom d'Irvine. Autour de l'histoire de ces deux Britanniques gravite un mystère exaltant, qui tient en haleine des milliers d'alpinistes : leur accident a-t-il eu lieu pendant l'ascension ou la descente du col nord de l'Everest ? Autrement dit : ont-ils atteint le sommet, 29 ans avant Tenzing Norgay et Edmund Hillary ?

Si leurs noms sont devenus indissociables, George Mallory et Andrew Irvine forment pourtant un binôme atypique. Le premier, ancien soldat de la Grande Guerre, est un alpiniste chevronné et réputé. On le surnomme même Monsieur Everest. Il a déjà ▸

fait partie de deux périples sur les pentes de la célèbre montagne, dont l'expédition de reconnaissance en 1922, qui pose les jalons en vue d'une tentative ultérieure vers le sommet, en 1924. « *Mallory est sans doute le premier "junkie" de l'Everest!* s'exclame Jochen Hemmleb, alpiniste et membre de l'expédition de 1999, qui a retrouvé le corps de George Mallory. *C'est lui qui représente la montagne aux yeux du grand public.* » Durant l'ascension de 1924, il doit donc faire face à une immense pression : on attend de lui qu'il atteigne le sommet. À l'inverse, Andrew Irvine (dont le surnom est Sandy) est tout à fait novice. « *À 22 ans, le jeune ingénieur est terriblement robuste, énergique et enthousiaste,* sourit Julie Summers, sa petite-nièce. *Ce qui lui vaudra d'être invité pour une première grande aventure sportive sur l'archipel du Svalbard par Noel Odell, un alpiniste qui s'apprête à grimper l'Everest avec une solide équipe.* » Là, Sandy Irvine fait ses preuves et Noel Odell, chargé de recruter

BARKER EVANS

« À 22 ans, le jeune ingénieur Andrew Irvine est terriblement robuste, énergique et enthousiaste »

Julie Summers, petite-nièce d'Andrew Irvine

un nouveau jeune homme pour l'expédition de l'Everest, ne tarde pas à lui proposer d'intégrer le groupe. Dans une lettre euphorique à son père, il écrira : « *Je suis aux anges!* » S'ensuivent trois semaines de préparation intensive en Suisse, et des mois de recherches sur les appareils à oxygène qui allaient accompagner les alpinistes sur les pentes du « toit du monde ».

L'expédition sur l'Everest est une entreprise colossale. Douze hommes britanniques, alpinistes et médecins, s'apprêtent à grimper la face nord de la montagne, côté tibétain, par la voie repérée lors de l'expédition de reconnaissance, deux ans plus tôt. Des centaines de sherpas transportent le matériel des alpinistes : vivres, tentes, matelas, bouteilles d'oxygène, mais aussi… une caméra ! Un cinéaste britannique, John Noel, entreprend de réaliser un film sur ce voyage : *L'Épopée de l'Everest.* Il capture leur arrivée au camp de base (5100 mètres), le 29 avril 1924. On y aperçoit George Mallory et Andrew Irvine, entourés de Charles Bruce et Edward Norton, chefs d'expédition.

La majorité des porteurs atteints du mal des montagnes

En quelques jours, le terrain caillouteux et glacial, pour le moins inaccueillant, se transforme en un véritable village fourmillant de vie : sherpas, messagers, interprètes et alpinistes s'y croisent jour et nuit. Déjà, à 5100 mètres d'altitude, la raréfaction de l'oxygène fatigue les alpinistes. Néanmoins, quelques jours après leur arrivée, les prises de sang réalisées par le médecin de l'expédition, Howard Somervell, indiquent d'excellents taux d'hémoglobine. Andrew Irvine en tête : « *J'espère que c'est un très bon signe* », écrira-t-il la veille de son départ du camp de base. Mais rapidement, un premier grain de sable vient enrayer l'engrenage pourtant bien huilé de leur ascension.

« *Ils appliquent un processus d'acclimatation très efficace : établir des campements de plus en plus haut, puis redescendre d'un ou deux bivouacs* », précise Julie Summers. Toujours accompagnés par les indispensables sherpas, femmes et hommes chargés chacun de 18 kg de matériel et provisions. Sandy Irvine et George Mallory doivent se rendre au camp III, établi à 6500 mètres d'alti-

TEMPÊTE

Le sauvetage des sherpas

Le 25 mai, alors que le camp IV est établi à plus de 7000 mètres par l'officier John de Vars Hazard, une tempête se lève ; l'équipe doit rebrousser chemin. Quatre porteurs jugent le risque trop grand et se réfugient dans les tentes fraîchement installées. L'officier le sait : si personne ne leur vient en aide, ils mourront ; deux d'entre eux souffrent déjà de gelures et les rations de nourriture sont très insuffisantes. Réunion d'urgence. Les alpinistes sont très affaiblis : maux de gorge aigus, diarrhée, manque de sommeil… Mais Edward Norton est ferme : il ne doit pas y avoir de victimes. Une équipe de secours remonte les chercher. Arrivés à portée de voix, séparés par un passage très escarpé, ils réussissent à convaincre les sherpas. Les deux premiers parviennent à les rejoindre. Mais les seconds commettent une grave erreur en entamant ensemble leur avancée le long de la falaise. Un pan de neige se détache et les fait glisser en contrebas. La neige fraîche les arrête, mais les deux hommes n'osent plus bouger. Howard Somervell n'a qu'une solution : se défaire pour les attraper. D'une main, il tient le bout de la corde qui le relie à ses compagnons et réussit *in extremis* à les ramener sur la sente.

NOEL E. ODELL/ROYAL GEOGRAPHICAL SOCIETY /GETTY IMAGES

CAPT. J.B. NOEL/ROYAL GEOGRAPHICAL SOCIETY / GETTY IMAGES

▲ **George Mallory et Andrew Irvine** photographiés en 1924 sur le glacier de Rongbuk.

◀ **Les membres de l'expédition de 1924.** Debout, de gauche à droite : Andrew Irvine, George Mallory, John de Vars Hazard, Noel Odell, Richard Hingston. En bas : Edward Shebbeare, Geoffrey Bruce, Howard Somervell et Bentley Beetham (photo colorisée).

tude, et y rester quelques jours. Cependant, outre la nuit glaciale à -19 °C au bivouac précédent, un autre ennui bien plus grave se profile. La grande majorité des porteurs sont désormais atteints par la mal aigu des montagnes. L'acheminement des denrées vers les campements supérieurs ralentit. Et, bien pire aux yeux des chefs d'expédition : les alpinistes sont contraints de faire des allers-retours supplémentaires pour porter eux-mêmes le chargement. « *C'est exactement le scénario que Norton et Bruce avaient voulu éviter à tout prix. Ils savaient bien que leur seul espoir d'atteindre le sommet était d'avoir des alpinistes en pleine forme et une solide équipe de porteurs pour les soutenir* », résume Julie Summers dans son livre *Fearless on Everest*. Le tableau s'assombrit. Edward Norton n'a plus d'autre choix que de procéder à une réorganisation radicale, ce qui signifiait notamment retarder la date de la première tentative vers le sommet. Un pari risqué au regard des conditions de vie épuisantes en altitude, et à l'approche de la saison des moussons… Bientôt, la météo jusqu'alors clémente contraint Edward Norton à sonner une retraite périlleuse *(lire l'encadré p. 78)*.

À ce stade de l'expédition, l'espoir d'atteindre le sommet s'est incontestablement terni. Le manque de temps presse les alpinistes de tenter leur chance. Il y aura deux essais. Edward Norton et Howard Somervell, tous deux très expérimentés et bien acclimatés, constituent la première équipe. Andrew Irvine, amer, écrit à ce sujet : « *Je me sens très en forme. J'aurais aimé être dans le premier groupe plutôt que dans la foutue réserve.* » Edward Norton et Howard Somervell grimperont sans bouteille d'oxygène dont ils ne sont pas convaincus de l'utilité, et dont l'encombrement et le poids, 13 kg, ne font pas débat… Contraints à faire demi-tour par la fatigue et le manque d'oxygène, ils atteindront 8570 mètres le 4 juin, un véritable exploit pour l'époque.

Les deux hommes partent avec des bouteilles d'oxygène

Sans attendre leur retour, George Mallory décide qu'il tentera également sa chance. « *Il se trouvait dans une position très délicate : il était le plus expérimenté, mais il était aussi celui dont on attendait le plus. Et cette pression a probablement joué un rôle dans sa tentative finale* », avance Jochen Hemmleb. D'autant qu'il était déjà frustré d'un premier essai avorté quelques jours plus tôt, avec Geoffrey Bruce, un des alpinistes les plus vigoureux. Contrairement à Edward Norton et Howard Somervell, il décide de partir avec les bouteilles d'oxygène, ▶

qui représentent un nouvel espoir. Et qui mieux que Andrew Irvine pour dompter ces engins capricieux… ? *« C'est exactement ce qu'il voulait entendre ! Il est survolté »*, rapporte sa petite-nièce sur la foi du journal de bord de l'alpiniste. Le 6 juin, les deux compagnons de cordée quittent le camp IV à 7 h 30. Noel Odell ne le sait pas encore, mais son appareil photo capture un instant historique : c'est le dernier cliché de George Mallory et Sandy Irvine en vie. Pendant une partie de l'ascension, les alpinistes continuent de communiquer avec Noel Odell, par l'intermédiaire des sherpas. Le temps est radieux, *« parfait pour ce que nous avons à faire »*, écrira George Mallory dans une note à Noel Odell. Le lendemain, ils s'installent au dernier bivouac, le camp VI, et les sherpas redescendent, porteurs de l'ultime message de George Mallory : *« Il ne sera pas trop tôt pour commencer à nous guetter aux alentours de 8 heures demain sur l'arête. »*

George Mallory aurait pu être sur le chemin du retour

Le 8 juin, comme convenu, les alpinistes quittent le camp VI, seuls, en direction du sommet. Noel Odell dira les avoir aperçus aux alentours de 12 h 50 à la base de la pyramide finale, juste avant que le ciel ne se couvre et que les deux points ne disparaissent dans les nuages. L'issue de cette tentative reste un mystère. Les

JAKE NORTON

Le corps de George Mallory avait été retrouvé en 1999 à plus de 8300 m d'altitude sur la face nord de l'Everest.

deux hommes ne revinrent jamais au campement. Noel Odell, héros oublié de cette expédition, arpenta les abords du dernier camp des heures durant, hurlant dans l'espoir de les retrouver. Mais ses appels furent vains, étouffés dans le blizzard glacial qui s'était installé. Qu'est-ce qui a causé la mort des deux hommes ? Ont-ils atteint le sommet ? Le corps de George Mallory retrouvé en 1999, à plus de 8300 mètres, dévoila de précieux indices sur ses derniers instants. *« Sa position, les bras tendus vers le haut, laisse penser qu'il a tenté de ralentir une chute,* raconte Jochen Hemmleb, historien alpin lors de l'expédition de recherche du corps. *Il y aurait même eu deux chutes en réalité… »* En 2010, les taches de sang sur les échantillons de vêtements prélevés sont analysées : *« Elles ont été causées par le contact avec une plaie saignante lors d'un premier accident, antérieur à la chute qui a causé sa mort »*, est-il rapporté. Deux autres détails intriguent les alpinistes : la paire de lunettes, soigneusement rangée dans la poche de George Mallory, laisse penser qu'il faisait nuit, et donc que l'homme était sur le chemin du retour au moment de sa chute. Un autre élément dénote par son absence cette fois : la photo de sa femme, que l'alpiniste avait prévu de déposer au sommet de l'Everest. Les lettres émouvantes qu'ils avaient échangées, elles, ont été retrouvées dans sa veste.

De nouvelles expéditions pour retrouver un appareil photo

Cent ans après leur disparition, impossible de trancher sur leur succès ou non dans cette quête du toit du monde. Le passage du légendaire « deuxième ressaut », en particulier, pose question. Les deux hommes auraient-ils pu escalader ce mur, dont ils ne connaissaient rien à l'époque et qui est aujourd'hui considéré comme l'un des plus ardus de toute l'ascension ? Seules les découvertes d'une preuve convaincante au-delà du ressaut, ou, mieux, de l'appareil photo que portait Andrew Irvine, pourraient y répondre. Aussi, la quête du corps du jeune homme constitue un élément clé dans cette énigme. *« La position exacte du pied n'a pas encore été révélée mais d'après les photos, il pourrait s'agir du glacier central de Rongbuk, autour de 5700 mètres »*, éclaire Jochen Hemmleb. Plusieurs hypothèses émergent. *« Irvine aurait pu dévaler la pente mais il est aussi possible que son corps ait été déplacé, soit par d'autres alpinistes, soit par une avalanche, »* ajoute-t-il. D'autres expéditions seront vraisemblablement menées autour du lieu où la chaussure a été découverte, dans l'espoir de mettre la main sur le fameux Kodak. *« Je pense que le mystère est merveilleux et l'histoire extraordinaire. Et, vous savez, à moins que nous trouvions une note dans sa poche qui dise : "Bon sang ! Nous n'avons pas réussi !", il n'y a aucune preuve qu'ils n'y soient pas arrivés, et c'est très bien ainsi ! »*, conclut Julie Summers. ■

MATÉRIEL

Un alpiniste concepteur et réparateur d'objets

MARY EVANS/SIPA

Andrew Irvine *(photo)* était un bricoleur très habile. Cet atout lui a sans doute valu d'être choisi par George Mallory pour sa dernière tentative vers le sommet. *« Sa dextérité était très appréciée au sein de l'équipe »*, rapporte Julie Summers, sa petite-nièce. Il avait réparé un appareil photo, une lampe, la montre de George Mallory et toute une série d'objets… *« La seule chose qu'il n'arrivait pas à réparer à vrai dire, c'était son propre couteau. Il le mentionne à plusieurs reprises dans son journal. Et il en était très contrarié »*, sourit Julie Summers. Plus étonnant encore : Andrew Irvine avait conçu une petite bouilloire à pression pour pouvoir boire du thé assez chaud même en altitude, puisque l'eau y bout à moindre température.

À la recherche du son des instruments disparus

Au croisement de l'histoire, de l'acoustique, de l'archéologie, de la science des matériaux, l'archéomusicologie étudie la conception et l'usage des instruments anciens. Avec, à la clé, leur reproduction physique ou numérique afin de comprendre comment ils sonnaient.

PRIAE

Trompette gallo-romaine appelée « tuba », étudiée par l'archéomusicologue Audrey Lecorgne au musée d'Histoire et d'Archéologie d'Orléans en vue de sa numérisation en 3D.

Une certaine effervescence règne à l'hôtel Cabu, qui abrite le musée d'Histoire et d'Archéologie d'Orléans, en cet avant-dernier week-end de septembre 2024. Sorti de sa vitrine, un rare exemplaire de trompette droite gallo-romaine en bronze — une *tuba* —, est présenté à un public restreint en préambule d'un projet de recherche. L'instrument fait partie du trésor de Neuvy-en-Sullias (Loiret), l'un des plus importants ensembles de bronzes gaulois et gallo-romains, découvert par les ouvriers d'un chantier en 1861. En clôture de l'événement, le multi-instrumentiste et archéologue écossais John Kenny, connu pour sa maîtrise du carnyx, un cuivre celte remontant à deux siècles avant notre ère, a joué d'un fac-similé de cette *tuba*.

Car l'original est inutilisable. *« Cette trompe est bâtie sur des proportions harmoniques, elle doit faire une certaine longueur,* explique Julian Cuvilliez, archéomusicologue et cofondateur du Pôle de recherche, d'interprétation et d'archéologie expérimentale (Priae), qui mène les travaux. *Or, en l'état, elle est beaucoup trop courte car elle a été trouvée démontée, et comme le manchon ne rentrait pas, il a été assemblé de force. Depuis, on n'y touche plus de peur qu'elle ne tombe en morceaux. »*

Archéomusicologie

La trompette a été étudiée une première fois en 2017 et le fac-similé a été fabriqué à partir d'analyses menées avec l'accélérateur de particules Aglaé, installé sous le Carrousel du Louvre, à Paris, et réservé aux œuvres d'art et aux objets archéologiques. Julian Cuvilliez a été sollicité pour fabriquer un deuxième fac-similé, en respectant le plus possible les procédés d'époque. Le premier avait été coulé dans un moule par une fonderie. Or, l'instrument original est une tôle de bronze étirée et écrouie, c'est-à-dire soumise à divers traitements thermiques pour être travaillée. « *D'habitude, si on chauffe à rouge un métal et qu'on le trempe dans l'eau, les molécules se tassent et créent un matériau très dense. Avec le bronze, c'est l'inverse. Donc on le chauffe, on le refroidit d'un coup et on le frappe pour le travailler* », poursuit Julian Cuvilliez. C'est ce processus, réitéré autant de fois que nécessaire, qui rend l'instrument si sonore. L'équipe tient compte du taux de rétractation du bronze au refroidissement, en façonnant au départ un instrument un peu plus gros que l'original. Ceci afin de s'approcher au mieux des propriétés harmoniques de la trompe originelle.

C2RMF

« L'artisan qui fabriquait une trompette dans l'Antiquité savait prédire le son qu'elle allait produire »

Benoît Mille, ingénieur de recherche au C2RMF (Centre de recherche et de restauration des musées de France)

Entre histoire, archéologie, acoustique, physique des matériaux, chimie, l'archéomusicologie est une discipline qui trouve son origine dans la seconde moitié du XIXe siècle, avec les travaux du luthier et musicien Auguste Tolbecque. S'appuyant sur des recherches approfondies, celui-ci s'est en effet mis à fabriquer des instruments anciens, tels une lyre antique à sept cordes, un archet de viole ou un rebec (instrument à cordes médiéval), entrés dans les collections du musée de la Musique à Paris.

Le plus ancien témoignage de danse chez les Gaulois

Bénéficiant aujourd'hui de l'apport des technologies de pointe (radiographie, tomodensitométrie, vibrométrie laser), la démarche concerne autant des vestiges d'objets que des représentations de musiciens, des notations musicales ou des chants sur des fresques, des sculptures, des mosaïques, des gravures. En 2019, la numérisation en 3D d'une statue en granit de barde gaulois a révélé des détails de la facture de la lyre tenue par le personnage.

En octobre 2024, les fresques du XIVe siècle sur les murs et les voûtes de la chapelle Saint-Antonin, à Toulouse, ont fait l'objet de relevés photogrammétriques. Cette numérisation en haute définition de peintures difficiles à observer *in situ*

SASCHA FRÜHHOLZ, UZH

PSYCHOACOUSTIQUE

Les sifflets aztèques dans les pièges de l'interprétation

Faits d'argile, les sifflets aztèques produisent un son évoquant un vent strident ou des cris d'effroi. D'où l'hypothèse qu'ils servaient lors de cérémonies funèbres voire de sacrifices humains. Des neuroscientifiques de l'université de Zurich (Suisse) ont voulu la vérifier, dans une étude parue dans *Nature* en novembre 2024. Ils ont testé sur des participants 270 sons produits avec des sifflets originaux, des reproductions et des versions artisanales. Résultat : les sifflets aztèques auraient un « *profil psychoacoustique et affectif typique des sons aversifs, effrayants et surprenants* ».

En forme de crâne, ce sifflet mortuaire produit un son strident.

L'imagerie cérébrale a ensuite montré qu'ils activent des zones liées à l'interprétation symbolique et associative. Autant d'indices forts, selon l'équipe, d'un usage lors de rituels sacrificiels. Mais l'archéomusicologue allemand Arnd Adje Both est sceptique. « *Certains instruments "crient" lorsqu'on souffle dedans avec force, mais sont plus "rauques" lorsqu'on en joue doucement. Les caractéristiques sonores "criantes" ou "effrayantes" relèvent de notre impression occidentale.* » Le chercheur rappelle que les victimes des sacrifices étaient souvent honorées en tant que représentants des dieux. « *Dans tous les cas, elles étaient droguées. Je ne pense donc pas que ces instruments aient été fabriqués pour les effrayer.* » Ces résultats trahiraient donc une vision fantasmée de la culture aztèque. **A. D. avec Sara de Lacerda**

sert de support scientifique à un projet d'étude et d'interprétation focalisé sur les instruments médiévaux représentés (psaltérion, rebec, organetto médiéval…). Le prisme musical n'est au fond qu'une porte d'accès à la meilleure connaissance d'un contexte plus général de pratiques sociales et artisanales d'une période. Les travaux sur une lance tintante (des plaques de métal font sonner la pointe évidée), trouvée dans la nécropole gauloise de l'hôpital Avicenne à Bobigny (Seine-Saint-Denis), ont établi qu'un dispositif servait à neutraliser la dangerosité de l'arme. « *Cela implique qu'elle était utilisée dans des mouvements susceptibles de blesser,* note Julian Cuvilliez. *Or, si vous associez mouvement et musique, vous obtenez la danse.* » Cette lance s'avère ainsi le plus ancien témoignage de danse chez les Gaulois.

Responsable du groupe objets et en charge des études métallurgiques au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), Benoît Mille a contribué aux premières analyses de la *tuba* de Neuvy-en-Sullias. Il en étudie actuellement une autre, découverte en 2021 au Forum antique de Bavay (Nord). Les résultats sont attendus pour 2026. « *L'artisan qui fabriquait une trompette dans l'Antiquité savait prédire le son qu'elle allait produire,* explique-t-il. *Ce qui nous apprend des choses sur le niveau de savoir-faire de l'époque, sur l'existence de professions très spécialisées.* » Cela va même plus loin. Des représentations comme la mosaïque de Zliten (Libye), datée du IIIe siècle, montrent de véritables orchestres, en l'occurrence une *tuba*, des *cornua* (trompettes courbes) et un orgue hydraulique. Ce qui implique que ces instruments étaient accordés.

Tous les projets ne donnent pas forcément lieu à des fac-similés. En revanche, les scans des instruments et la photogrammétrie permettent de créer des modèles numériques 3D reproduisant la structure interne et la texture externe de l'objet. Ce dernier peut alors être virtuellement manipulé sans risque de dommages, ses défauts (déformations, manques) peuvent être rectifiés et des éléments séparés réassemblés. Avec, au terme de la démarche, l'application de logiciels de modélisation sonore à l'objet virtuel reconstitué.

POUR EN SAVOIR PLUS

Retrouvez la réplique d'un « cornu » de Pompéi réalisée et jouée par le facteur d'instruments Abraham Cupeiro dans cette vidéo : sciav.fr/937cornu

Certains modèles 3D ne sonnent pas du tout

C'est ce qu'a fait l'Ircam (Institut de recherche et coordination acoustique/musique) à Paris avec des *cornua* de Pompéi conservés au Musée archéologique national de Naples (Italie). « *Il s'agit d'un grand puzzle de cinq* cornua *démontés,* explique Benoît Mille. *J'ai fait tester par l'Ircam plusieurs hypothèses de montage et il s'est avéré que certains modèles 3D ne sonnaient pas du tout!* » Ce qui permet d'invalider les assemblages correspondants. La trompette de Bavay doit faire l'objet d'un projet similaire.

Il reste néanmoins des cas où l'instrument originel est peu ou prou utilisable. En 2021, une équipe de recherche a établi qu'une conque vieille de 18 000 ans, trouvée dans la grotte ornée de Marsoulas (Haute-Garonne) en 1931 et conservée au Muséum de Toulouse, avait servi d'instrument à vent. Ce coquillage avait été façonné pour y faire circuler l'air avec, selon l'hypothèse des chercheurs, un embout buccal. Pour étayer cette piste, un joueur de cor a été sollicité pour souffler dans la conque. Il a réussi à en sortir un do, un do dièse et un ré. Trois notes comme revenues des temps préhistoriques. ■

Arnaud Devillard

Lance tintante retrouvée dans une tombe celtique à Bobigny (280 avant J.-C.) (à gauche) ; conque découverte dans la grotte de Marsoulas, utilisée il y a 18 000 ans (à droite) ; musicien romain jouant du « cornu » (gravure du XIXe siècle) (en bas).

PHOTOPQR/LE PARISIEN/HÉLÈNE HAUS

WIKIMEDIA COMMONS/MUSÉUM DE TOULOUSE

IMAGEBROKER.COM/ COLL. CHRISTOPHEL

Sur les traces du nouveau « T. rex »

L'ouvrage de notre collaborateur Joël Ignasse brosse un nouveau portrait de ces dinosaures, loin des représentations fantasmées. Il raconte le travail passionnant des chercheurs qui, grâce aux nouvelles technologies, révèlent des informations précieuses sur les fossiles et dévoilent ainsi une autre histoire des « T. rex ». En voici des extraits.

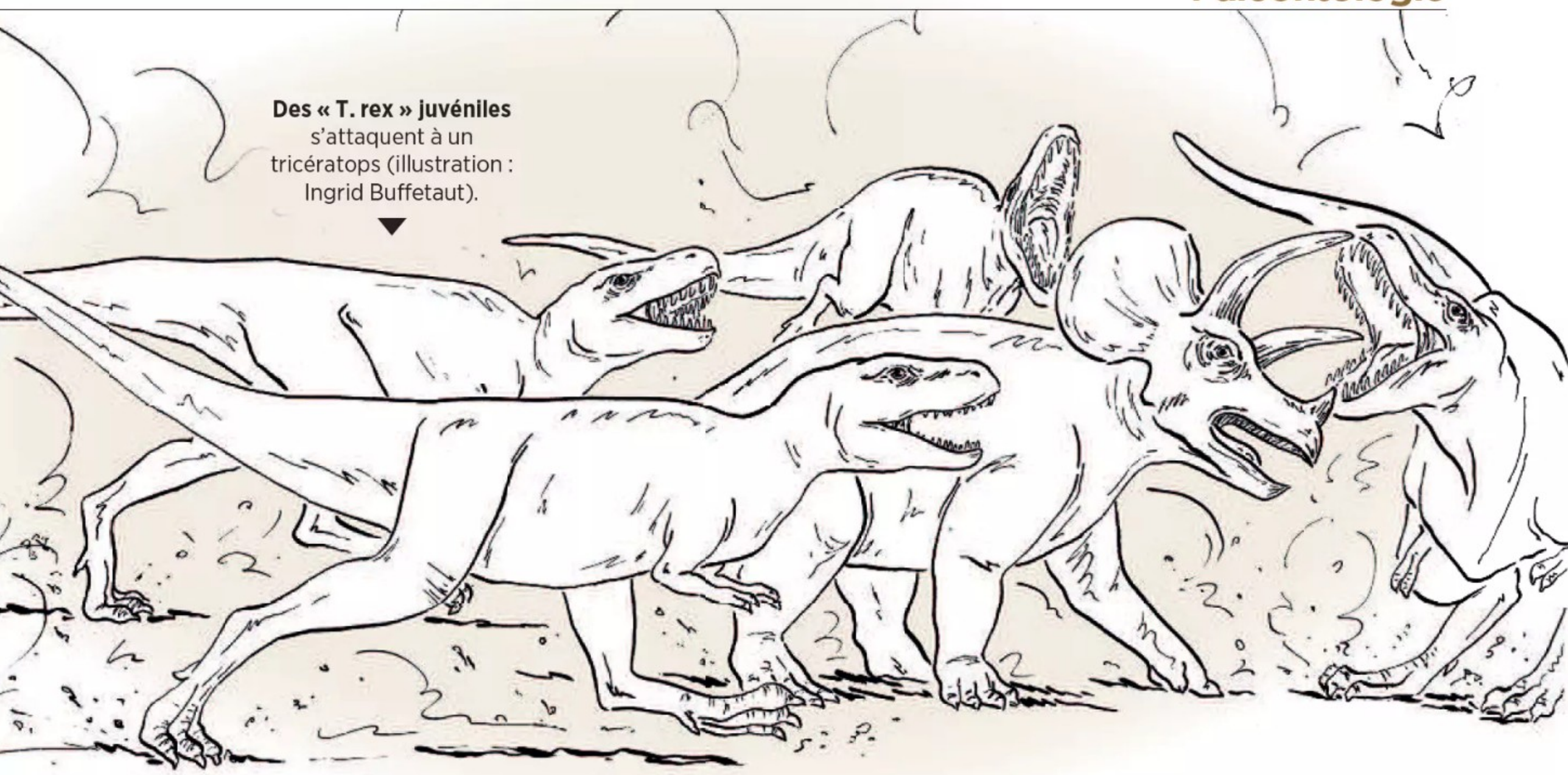
“Fermez les yeux et imaginez un dinosaure. Il y a de fortes chances que votre cerveau ait construit le portrait d'une créature massive, bardée de dents menaçantes prête à vous croquer. Sans doute aussi est-elle verdâtre et écailleuse. Normal, c'est l'image d'Épinal associée à ces « grands reptiles ». Elle a été esquissée dès la découverte des premiers ossements fossilisés, au début du XIXe siècle. Depuis, les paléontologues ont exhumé des dizaines de milliers de fossiles, tous différents les uns des autres, et ils utilisent dorénavant une vaste gamme d'instruments et de techniques pour les étudier. Aussi, il est temps de dépasser cette idée première pour dresser une nouvelle représentation de ces dinosaures qui soit plus juste sur le plan anatomique comme scientifique.”

Des soins postnataux

“Chez les dinosaures à bec de canard, on trouve les nids de la « bonne mère lézard », *Maiasaura peeblesorum*. Ce gros dinosaure herbivore, à l'avant de la tête aplatie, mesurait dans les 9 mètres de longueur pour un poids d'environ 2 tonnes. Il est connu par plusieurs dizaines de spécimens, tous provenant de la formation de Two Medicine, dans le Montana [États-Unis], qui abrite des fossiles datant de 83,6 à 72,1 millions d'années. Au même endroit, plusieurs nids mesurant environ 2 mètres de largeur et pouvant contenir jusqu'à 25 œufs ont été identifiés. L'un d'entre eux, le premier trouvé en 1978, est célèbre tant par sa nature même (le premier nid contenant des ossements de bébé dinosaure découvert en Amérique du Nord), que par l'identité de sa découvreuse, Marion Brandvold, qui est décédée en 2014, à l'âge respectable de 102 ans. Cette paléontologue a passé une grande partie de sa vie à fouiller dans les Rocheuses et une autre à se battre pour le rapatriement des os qu'elle avait découverts (et qui avaient entretemps abouti à l'université de Yale) au Montana Dinosaur Center de Bynum, sa ville. Dans ce nid de *Maiasaura* se trouvaient les restes de juvéniles trop grands pour être des nouveau-nés. Cela indique probablement qu'ils sont restés là et qu'un adulte devait prendre soin d'eux.

Aussi, la structure de certains troupeaux, comme ceux des Mussaurus, mais également d'autres groupes constitués de juvéniles, comme ces trois *Alamosaurus sanjuanensis*, des titanosaures au long cou qui pouvaient mesurer jusqu'à 20 mètres de long et peser plus de 20 tonnes à l'âge adulte, trouvés au Texas, confirme cette hypothèse. La dizaine de squelettes de jeunes *Sinornithomimus dongi* de Mongolie, qui se sont probablement noyés ensemble, alors qu'ils étaient tous âgés de 1 à 2 ans, suggère également que de nombreux dinosaures avaient adopté un arrangement social avec des groupes d'âge différents et des adultes qui devaient protéger les plus jeunes, encore incapables de se défendre face aux prédateurs. S'ils

Sur les traces du nouveau T. rex, Joël Ignasse, préface d'Éric Buffetaut, Eyrolles, 255 p., 18 €, parution le 13 mars



Des « T. rex » juvéniles s'attaquent à un tricératops (illustration : Ingrid Buffetaut).

n'étaient pas tous autant impliqués dans les soins postnataux, il est donc établi que chez les dinosaures, cette stratégie de survie a commencé à se développer et qu'elle a été améliorée par les oiseaux."

Un assoupissement à la façon des oiseaux

"À quoi pouvaient bien rêver les dinosaures ? D'ailleurs, rêvaient-ils vraiment ? Personne ne pourra jamais répondre à cette question, qui nécessiterait d'enregistrer les ondes cérébrales… d'un dinosaure en train de dormir. Mais de récentes études ont prouvé que les oiseaux et certains reptiles possédaient les deux états du sommeil : le sommeil lent et le sommeil actif ou REM, classiquement associé aux rêves.

Les dinosaures, qui se situent entre ces deux groupes, disposaient peut-être aussi de cette fonction. En tout cas, comme tous les animaux, ils devaient faire des sommes, quelle que soit la forme que prenait cet assoupissement et les positions qu'ils adoptaient pour se reposer. Concernant ces positions de relâchement, il est encore une fois possible de se référer aux oiseaux (au moins pour les petits dinosaures à plume), qui dorment pour certains perchés sur une branche, et pour d'autres en se recroquevillant sur eux-mêmes afin de conserver leur chaleur et d'offrir une surface réduite aux éventuels prédateurs. Certains spécimens de dinosaures ont aussi été retrouvés dans cette posture, morts endormis et figés depuis des dizaines de millions d'années.

L'un des premiers décrits est le « dragon endormi », Mei long, un petit dinosaure à plumes ressemblant à un oiseau de la famille des troodontidés qui vivait en Chine, il y a 130 millions d'années. L'un des spécimens découverts en 2004 était un juvénile de moins de 60 centimètres, qui reposait la tête coincée sous un de ses membres antérieurs, et les pattes repliées sous le corps dans une posture similaire à celle de certains oiseaux au repos. Sa longue queue s'enroulait vers l'avant jusque sous le cou. Il a sans doute été enseveli sous une nuée de cendres volcaniques sans même se réveiller.

En 2023, c'est une autre petite bête à plumes qui a été déterrée dans le désert de Gobi, en Mongolie. Celle-ci y résidait il y a 71 millions d'années. Il s'agit d'un alvarezsauridé, un groupe dont les représentants sont trouvés un peu partout dans le monde. Baptisé *Jaculinykus yaruui*, il est un peu plus long que Mei long. Son fossile a également été découvert dans une position de sommeil.

Ces deux dinosaures à plume se classent parmi les plus proches parents des oiseaux et il n'est pas réellement surprenant de les voir s'assoupir à leur façon. Même chose pour *Sinornithoides youngi*, un autre dinosaure originaire de Mongolie qui a été découvert dans les années 1990 dans la même position que Mei long.

Et des indices de ce même comportement sont pareillement présents chez les ornithischiens, l'autre branche des dinosaures. L'occasion de découvrir *Changmiania liaoningensis*, dont le nom de genre signifie « dormeur éternel », un ornithopode primitif qui s'assoupissait probablement dans des terriers. C'est en tout cas ce que suggèrent les deux seuls spécimens découverts en Chine et qui sont âgés de 123,2 millions d'années." ■

La vie latente, aux limites du vivant

Au XVIIIe siècle, des savants découvrent que certains organismes microscopiques peuvent rester inertes pendant des mois et retrouver ensuite une vie active. Cette propriété sera largement débattue. Claude Bernard en fera, lui, un élément déterminant dans la théorie physiologique.

Par Stéphane Tirard

Couramment présente chez de nombreuses espèces, la vie latente consiste en un arrêt total et réversible du métabolisme. Elle est aujourd'hui au cœur d'un large ensemble de techniques de conservation par le froid, comme les banques de graines ou la congélation à très basse température des ovocytes, embryons ou spermatozoïdes. Si les premiers efforts d'observation de cet état remontent au XVIIIe siècle, les biologistes du siècle suivant se sont activement interrogés sur sa nature physiologique.

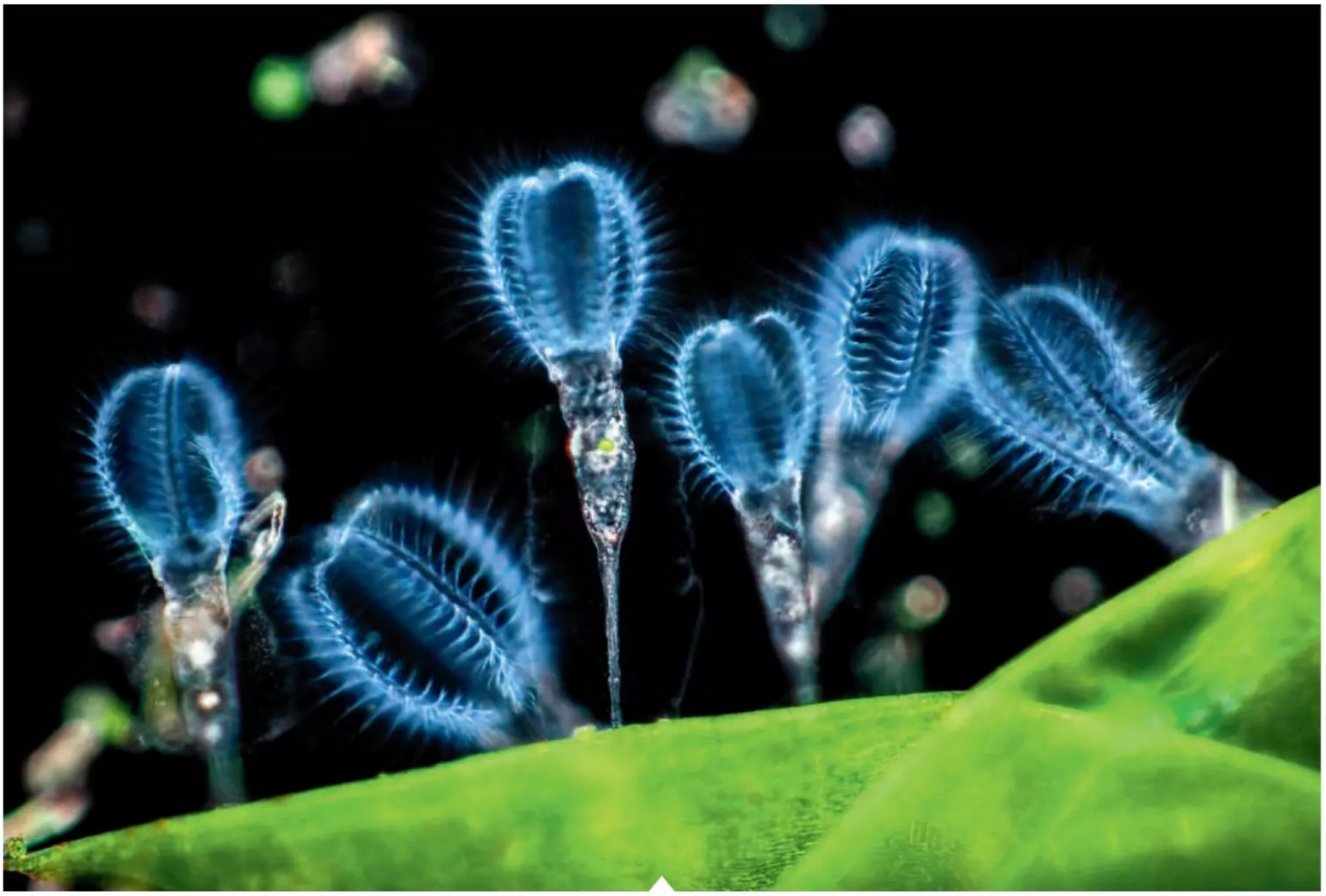
En 1702, le savant néerlandais Antoni van Leeuwenhoek découvre dans la poussière des gouttières des maisons de petits animalcules qu'il nomme « rotifères ». Il remarque qu'ils sont capables de se dessécher dans des conditions particulières, de rester inertes pendant des mois et de retrouver une vie active après réhydratation. À l'époque, cette propriété sera couramment nommée « résurrection ». Plusieurs naturalistes comme Maurice Roffredi, Felice Fontana, John Needham ou Lazzaro Spallanzani mènent alors de nombreuses observations et expériences sur ces rotifères, ainsi que sur les tardigrades et des petits vers appelés anguillules. Les travaux de Lazzaro Spallanzani sont les plus poussés. Dans un premier temps, il tente d'identifier les animalcules possédant cette propriété et montre que la majorité des espèces ne reviennent pas à la vie après avoir été exposées à une perte d'eau importante. La « résurrection » ne s'avère possible que chez les rotifères, les tardigrades et les anguillules. Par des expériences précises, il détermine le nombre de cycles de dessiccation, réhydratation et retour à la vie active que ces petits animaux sont capables d'effectuer dans différentes conditions. Il observe aussi leur résistance aux conditions extrêmes de température. Mais la question principale est la suivante : ces animaux sont-ils morts ou vivants lorsqu'ils sont temporairement desséchés ? Le problème abordé par l'expérience était bien sûr également très philosophique. Au terme de son principal écrit sur le sujet, Lazzaro Spallanzani ne se résout pas à admettre un retour à la vie et affirme donc que l'état inerte n'existe pas et qu'un infime fil de vie ne cesse d'exister.

OPHELIE TIRARD

Professeur au centre François-Viète d'épistémologie et d'histoire des sciences de l'université de Nantes, Stéphane Tirard est l'auteur du livre « Histoire de la vie latente », chez De Boeck Supérieur.

Des controverses entre savants sur la nature de l'état latent

Cette opinion n'est pas sans lien avec son rejet des générations spontanées, au sujet desquelles il débat avec John Needham qui, pour sa part, en était un partisan. L'objet de leur discussion était la formation d'anguilles dans la maladie du blé niellé. John Needham prétend que ces animal-



FRANK FOX/SOL/SUCRÉ SALÉ

Les rotifères (ici l'espèce « Stephanoceros fimbriatus » vue au microscope), des micro-organismes vivant principalement en eau douce, ont l'étonnante capacité de revenir à la vie après des mois passés à l'état de dessèchement et d'inertie.

cules se produisent par génération spontanée, tandis que Lazzaro Spallanzani est convaincu qu'elles proviennent d'une génération précédente, après une période de dessèchement. En d'autres termes, il pense qu'un « petit fil de la vie » persiste d'une génération d'anguillules à l'autre. Il existe une opposition analogue entre les deux naturalistes sur la question de la procréation. En effet, John Needham est épigéniste et Lazzaro Spallanzani croit à la préexistence de structures dans les germes, c'est-à-dire à la continuité de l'organisation des êtres vivants à travers les générations. Ainsi, sur ces trois points, Lazzaro Spallanzani est convaincu de la continuité de la vie. Il s'oppose à toute possibilité d'une nouvelle organisation pour chaque organisme individuel.

Tout au long du XIXe siècle, un vif intérêt se développe en France au sujet de la vie latente. Le premier contributeur est François Dutrochet. Dans un mémoire qu'il consacre à ses expériences sur les tardigrades et aux rotifères, il affirme que ces animaux une fois desséchés sont morts, mais qu'en présence d'eau ils reprennent immédiatement vie. Le deuxième épisode marquant est la thèse de Louis Michel Doyère, soutenue en Sorbonne en 1842 et consacrée aux tardigrades. Le jeune biologiste, qui poursuit méthodiquement les expériences de Lazzaro Spallanzani et de François Dutrochet, définit deux états : la vie *in potentia* et la vie *in actu*. La première est caractérisée par l'arrêt de tout phénomène physiologique lors de la période de dessiccation, durant laquelle l'organisation organique est préservée. La vie redevient active, vie *in actu*, lors du retour à des conditions favorables. Mais malgré l'intérêt et la qualité des travaux de Louis Michel Doyère, le débat sur la nature de cet état latent est loin d'être clos.

En effet, en 1859, une importante controverse s'engage. Elle oppose les tenants d'un arrêt total ▶

du métabolisme, position dont Louis Michel Doyère est le chef de file, à Félix Pouchet, un biologiste rouennais qui soutient qu'une activité vitale persiste. Ce même Félix Pouchet, qui affrontera ensuite Louis Pasteur au sujet des générations spontanées, affirme que rien ne peut ramener à la vie un animal desséché, quelles que soient les précautions prises lors de la dessiccation.

Les formes de vie dépendent du degré d'adaptation au milieu extérieur

En vue d'en terminer avec cette opposition, la Société française de biologie organise un débat. Au cours de 42 séances, une commission auditionne les deux groupes en lice. Ces expériences illustrent l'immense défi auquel les biologistes sont alors confrontés lorsqu'ils tentent d'explorer ce phénomène, la difficulté expérimentale résidant dans le fait d'obtenir des preuves de la sécheresse réelle des tissus animaux et de l'absence de métabolisme dans les organismes. En 1860, le président de la commission, Paul Broca, pour qui le sujet relève de « *la biologie la plus générale et la plus élevée* », rédige un rapport concluant clairement en faveur de Louis Michel Doyère et considérant que l'état inerte préserve la structure de la matière qui constitue ces organismes. Il s'agissait de trancher entre « *un phénomène vital ou […] un phénomène indépendant de la vie* » et c'est donc pour la seconde possibilité que se prononce la commission.
L'état de vie latente étant établi comme un état inerte et toute interprétation vitaliste écartée,

AKG IMAGES

Claude Bernard (1813-1878).

cette propriété est considérée avec beaucoup d'intérêt par le physiologiste Claude Bernard. Après une première utilisation dans son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* en 1865, il mobilise cette notion dans ses *Leçons sur les phénomènes de la vie commune aux animaux et aux plantes* (1878).
Dans la deuxième leçon intitulée « Les trois formes de la vie », il affirme tout d'abord que la vie est un conflit qui se traduit par « *un rapport étroit et harmonieux entre les conditions extérieures et la constitution préétablie de l'organisme. Ce n'est pas en luttant contre les conditions cosmiques que l'organisme se développe et se maintient, mais au contraire en s'adaptant et en se mêlant à ces forces cosmiques.* » Il désigne ensuite les trois formes de la vie qui correspondent à trois types de relations entre l'organisme et le milieu extérieur, c'est-à-dire des degrés différents de dépendance au milieu extérieur — la vie latente : « *la vie n'est pas manifeste* » ; la vie oscillante : « *les manifestations variables dépendent du milieu extérieur (cas de l'arbre)* » ; et la vie constante : « *la vie dont les manifestations sont libres et indépendantes du milieu extérieur* ».

Une étude de la vie latente conduite à l'échelle des cellules

Selon Claude Bernard, le dessèchement est la mesure de protection des organismes de la première forme de la vie lorsqu'ils sont exposés aux vicissitudes atmosphériques. C'est pour eux la condition de leur survie. Cela concerne aussi bien les animaux (rotifères, tardigrades, nématodes…) que les graines des plantes. Quant à la forme constante de la vie, c'est l'existence d'un milieu intérieur (concept bernardien) régulé qui confère à l'organisme son indépendance relativement aux conditions extérieures. Dans la suite de ses leçons, le physiologiste pousse son explication de la vie latente au niveau des cellules et notamment du protoplasme, dans lequel, selon lui, se réalise le processus de la vie. Il affirme que là résident simultanément le siège de la création vitale, c'est-à-dire des synthèses organiques, et celui des phénomènes de mort, c'est-à-dire de destruction organique. Ceci faisant écho à la double affirmation qu'il avait précédemment formulée : « *La vie, c'est la création* » et « *la vie c'est la mort* ». Ce sont les conditions extérieures qui influencent la mise en action des phénomènes dans la première forme de la vie. Selon lui, la dessiccation est

THÉORIE

L'immortalité des molécules organiques

Le point de vue du biologiste Félix Pouchet (1800-1872), qui soutient qu'une activité vitale persiste lorsque les tardigrades sont desséchés, peut s'expliquer par l'immortalité qu'il attribuait aux molécules organiques. Cette conviction vitaliste s'appliquait à la vie latente comme aux générations spontanées, comme il l'écrit en 1859 dans *Hétérogénie, ou traité de la génération spontanée* : *« […] les particules organiques, tantôt intimement unies, et formant des organismes, et tantôt à l'état de liberté dans l'espace, n'en sont pas moins animées d'une vie latente, qui paraît n'attendre que le regroupement pour se manifester ostensiblement. Il semble que pour les molécules organiques, il n'y ait pas de mort réelle dans toute l'acception du mot, et qu'il n'y a pour elle qu'une transmission à une nouvelle vie. »*

Selon Claude Bernard, le dessèchement est la mesure de protection des organismes lorsqu'ils sont exposés aux vicissitudes atmosphériques. C'est pour eux la condition de leur survie

la première condition du passage de la vie manifestée à la vie latente. Elle a pour conséquence immédiate d'arrêter la destruction organique, qui est l'un des deux termes de sa définition de la vie. Il ajoute que des corps chimiques essentiels deviennent secs et inertes, ce qui provoque l'arrêt des phénomènes de destruction vitale. Pour argumenter ce point, Claude Bernard s'est notamment appuyé sur les travaux de Michel-Eugène Chevreul. Ce chimiste a en effet étudié la capacité de certains tissus ou corps à se dessécher et à se réhydrater : les tendons, les tissus fibreux, les substances albuminoïdes et les ferments. Dans un deuxième temps, la création s'arrête à son tour. La vie est alors « *suspendue* », dans un état « *d'indifférence chimique* ». Enfin, le retour à la vie manifestée commence par la restauration de la destruction organique, à l'aide des substances accumulées avant la phase de vie latente, la création intervenant dans un second temps. Au terme des travaux de Claude Bernard, la vie latente, qui était jusqu'alors une curiosité zoologique avec les tardigrades, les rotifères et les anguillules, ou une propriété triviale avec les graines, est devenue un élément déterminant dans une théorie physiologique. Mais, en plaçant les biologistes face aux limites du vivant, la vie latente ne cessera d'animer les questionnements philosophiques et biologiques. Au XX^e^ siècle, l'étude de la cellule ouvrira de nouvelles perspectives, importantes tant pour la compréhension du phénomène que pour le développement d'applications dans le cadre de la cryoconservation. ■

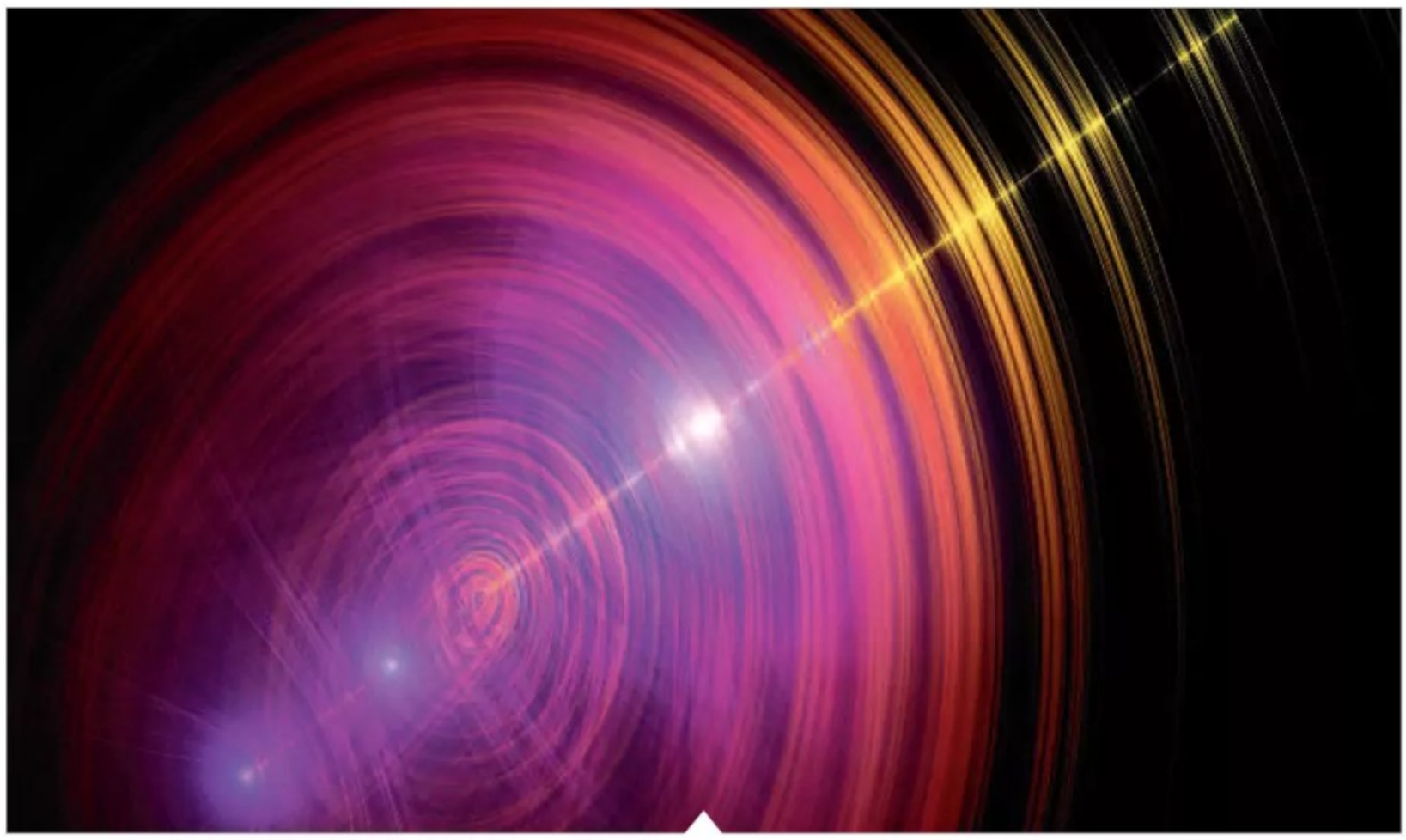
148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Chez votre marchand de journaux

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

TRANSVERSALES



SPL/SUCRÉSALÉ

L'intrication, l'une des propriétés les plus étonnantes de la mécanique quantique (illustration).

Les leçons quantiques d'Alain Aspect

Le prix Nobel de physique 2022 nous emporte dans une exploration du monde quantique et tranche le débat entre Albert Einstein et Niels Bohr.

DÉMONSTRATION Deux ans après avoir reçu le prix Nobel de physique aux côtés d'Anton Zeilinger et de John Clauser, Alain Aspect revient sur l'aventure scientifique qui, commencée en 1974, l'a conduit à démontrer l'intrication quantique à l'Institut d'optique d'Orsay au début des années 1980. Et trancher par la même occasion un débat remontant à 1935 entre Albert Einstein et Niels Bohr, sur la nature de la réalité quantique…

L'intrication relie deux particules de manière instantanée, quelle que soit la distance qui les sépare. Albert Einstein voyait là une absurdité, la preuve d'une théorie incomplète, tandis que Niels Bohr y lisait au contraire une validation de la mécanique quantique. En 1964, John Bell (1928-1990) conçoit un théorème permettant de tester ces deux approches. Alain Aspect réussira à traduire expérimentalement les travaux de John Bell, et confirmera la théorie quantique selon la vision de Niels Bohr. L'ouvrage, qui recourt souvent aux équations, déconcertera un peu les lecteurs non physiciens. Il comporte néanmoins de nombreuses notes et résumés pour faciliter la progression dans la lecture. Les plus aguerris auront la satisfaction de suivre au plus près la démarche scientifique d'Alain Aspect, ce qui constitue le grand mérite du livre.

Dans une dernière partie, le physicien développe les applications issues de ses travaux, comme l'ordinateur quantique dont il accompagne la genèse en prenant part à plusieurs start-up. Des fondements de la physique à l'essor des technologies de demain, Alain Aspect nous emporte ainsi dans une exploration minutieuse du monde quantique avec un enthousiasme communicatif. ■ **Fabrice Nicot**

Si Einstein avait su, Alain Aspect, Odile Jacob, 368 p., 24,90 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

Gros plan sur la forêt

PHOTO La forêt investie par la photographie fait ici l'objet d'un essai dense, truffé de références philosophiques et ponctué d'illustrations, qui associe progression chronologique et décryptages thématiques. Opposée à celle, utilitariste, des gestionnaires, la vision des photographes offre une approche sensible. L'auteure analyse photo paysagère et enquête documentaire, expérimentation avec le végétal photosensible et plongée dans le microscopique, dans les mythologies ou les territoires en lutte. **A. De B.**

Quand la photographie pense la forêt, Danièle Méaux, Filigranes éditions, 269 p., 23 €

Alerte à la surpêche

BD En France, 2025 est l'année de la mer. Qui n'est pas intarissable. Les trois ans d'enquête menée par l'auteur de cette BD — fondateur de l'ONG Seastemik — sont racontés en 12 chapitres par un goéland. L'oiseau témoigne des ravages causés par

l'effrayante puissance de gaspillage des chalutiers-congélateurs ou par les filets dans lesquels périssent les dauphins. Les conflits entre grosses flottes et pêche artisanale sont aussi mis en scène, de façon peut-être un peu trop didactique mais efficace. Le but : alerter sur la nécessité d'un sursaut politique. **A. De B.**

On a mangé la mer, Maxime de Lisle, Olivier Martin, Futuropolis, 128 p., 22 €

L'Univers décrypté

EXPLORATION Ancien étudiant du célèbre cosmologiste britannique Stephen Hawking, Christophe Galfard s'attache une nouvelle

fois à vulgariser pour les plus jeunes des notions astrophysiques complexes, telles que la fusion thermonucléaire qui fait étinceler les étoiles, les éjections de masse coronale solaire qui illuminent nos nuits d'aurores boréales... Il nous entraîne pour cela dans un voyage cosmique splendidement illustré et dessiné, dans le sillage de trois petits personnages attachants qui parleront aux plus jeunes. **S. R.**

Les Explorateurs de l'Univers, Christophe Galfard, Fanny Antigny, Michel Lafon, 96 p., 19,95 €

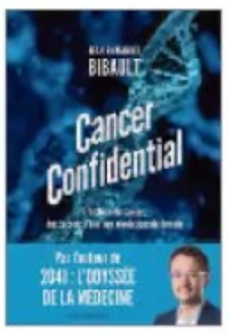
Les errances du capitalisme

RESSOURCES Économiste et historien à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS), l'auteur s'intéresse dans cet ouvrage à la finitude des ressources à laquelle nos économies capitalistes sont confrontées. Il en propose une analyse historique au travers de trois périodes qui ont connu les mêmes mécanismes de rivalité pour accaparer mers, terres et aujourd'hui cyberespace : XVIe-XVIIIe siècle, 1880-1945 et depuis 2010. Quand le capitalisme concurrentiel prône la libre concurrence et l'innovation au bénéfice d'un grand nombre d'acteurs, le capitalisme de la finitude favorise les entreprises monopolistiques et les États dans une logique de domination au profit de quelques-uns. Après le temps des compagnies à monopole — telle la Compagnie des Indes — qui s'appuyaient dans la première période sur la puissance navale des États, puis celui de la « ruée vers l'Afrique » et l'Asie de l'Est au tournant du XXe siècle, nous voici dominés par de grandes firmes cyber-souveraines (Gafa), par le retour du protectionnisme et la militarisation des voies d'échanges économiques... Une démonstration inquiétante ! ■ **Sylvie Rouat**

Le Monde confisqué. Essai sur le capitalisme de la finitude (xvie-xxie siècle), Arnaud Orain, Flammarion, 368 p., 23,90 €

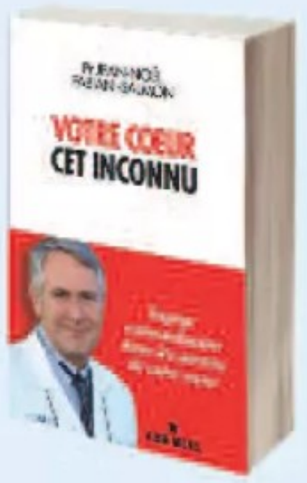
Le long combat contre le cancer

ORIGINES Saviez-vous que le premier cas de cancer détecté remonte à 1,7 million d'années ? Et que ses symptômes sont déjà évoqués dans un papyrus daté du XVIIe siècle avant J.-C. ? Jean-Emmanuel Bibault, professeur en oncologie-radiothérapie,



fait tomber les fausses croyances sur ce fléau en revenant à ses origines. Il retrace aussi le combat mené par les médecins et chercheurs pour trouver des traitements de plus en plus efficaces contre le cancer, avec la perspective de le vaincre enfin dans un futur proche. **L. L.**

Cancer Confidential, Jean-Emmanuel Bibault, Ed. des Équateurs, 224 p., 20 €



Chroniques d'un cardiologue

PORTRAIT *« On a tous fait ce cauchemar du cœur qui glisse et se retrouve par terre... inutilisable. »* Tous ? Non, mais les chirurgiens chargés d'assurer une transplantation cardiaque, oui. C'est le cas du Pr Jean-Noël Fabiani qui livre un essai saisissant consacré à l'organe noble qui a occupé sa vie entière, jusqu'à mettre celle-ci en péril. Le récit s'ouvre en effet sur un coup du sort : alors jeune retraité du service de chirurgie cardio-vasculaire de l'hôpital européen Georges-Pompidou qu'il a dirigé pendant 20 ans, il se voit diagnostiquer un anévrisme de l'aorte qui menace sa vie à brève échéance... Au-delà de cet épisode, l'éminent professeur rend un vibrant hommage à cet organe, retraçant une histoire médicale riche, jusqu'à l'avènement du cœur artificiel. L'œuvre d'un passionné, grand témoin de l'essor de la chirurgie cardiaque ces 50 dernières années, dont la technicité n'encombre jamais une écriture enlevée, captivante, battant la chamade en quelque sorte. ■ **Hugo Jalinière**

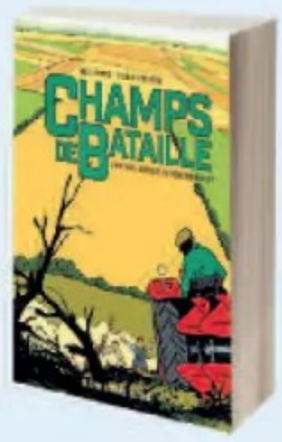
Votre cœur, cet inconnu, Pr Jean-Noël Fabiani-Salmon, Albin Michel, 212 p., 20,90 €

C'EST À LIRE

Réévaluer sa consommation d'alcool

GUIDE Mickael Naassila a écrit ce livre après avoir été frappé par une remarque désagréable de la journaliste Léa Salamé à l'humoriste Artus, qui expliquait avoir arrêté de boire. Il y explore l'impact de l'alcool sur la santé et propose des pistes pour changer notre relation à cette boisson. Cet essai contient aussi des tests pour évaluer sa consommation, des explications sur les prises en charge. Rigoureux et accessible, il se révèle utile dans un pays où la consommation d'alcool reste parmi les plus élevées au monde. **I. do O'G.**

J'arrête de boire sans devenir chiant, Mickael Naassila, Solar, 224 p., 18,90 €



Douloureux remembrement

BD Qui ne se souvient pas des photos aériennes de nos livres de géographie, montrant un paysage de bocage face à de grands champs ouverts pour illustrer le remembrement ? Selon nos cours, ce processus avait permis de regrouper les parcelles, de remplacer les chevaux par des tracteurs et d'améliorer les conditions de vie des paysans. Cette modernisation de l'agriculture visait aussi à garantir l'autosuffisance alimentaire de la France d'après-guerre et à en faire une puissance agricole exportatrice. Mais ces clichés ne disaient pas tout. Pour de nombreux paysans bretons, ardéchois ou limousins, le remembrement, commencé sous Vichy, fut un véritable déchirement. Ainsi en témoigne cette BD, qui retrace brillamment la manière dont ce réaménagement foncier s'est concrètement déroulé, tout en donnant la parole à ceux qui l'ont vécu. Cet album éclaire un sujet peu exploré tout en questionnant les conséquences écologiques et humaines de cette transformation profonde de la campagne française. ■ **Isabelle do O'Gomes**

Champs de bataille, Inès Léraud et Pierre Van Hove, Delcourt, 192 p., 23,75 €

Cook face à son destin

ENQUÊTE On connaît la fin tragique du capitaine James Cook : tué sur une plage par des Hawaïens en colère. Mais ce que l'on apprend dans ce récit d'aventure tout autant qu'enquête historique, ce sont les vicissitudes ayant conduit l'explorateur — parti en 1776 à bord du HMS *Resolution* avec en ligne de mire le passage du Nord-Ouest — à sa mort, trois ans plus tard. L'auteur lâche ceci : *« Le plus surprenant n'est peut-être pas que Cook mourût de manière violente, mais que cela ne soit pas arrivé plus tôt, sur une autre île. »* Au lecteur d'embarquer donc à la découverte de la complexité de ce personnage ! **A. De B.**

Sur la vaste vaste mer, Hampton Sides, Paulsen, 435 p., 25 €

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 928 ❑ N° 929/930 ❑ N° 931 ❑ N° 932
❑ N° 933 ❑ N° 934 ❑ N° 935 ❑ N° 936

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

N° 928
La France à +4 °C.
Ce qui va changer

N° 929/930
20 questions qui obsèdent les scientifiques

N° 931
La molécule miracle

N° 932
L'ordinateur quantique arrive !

N° 933
Prendre le contrôle de ses rêves

N° 934 Voie Lactée. Révélations sur les mystères de notre galaxie

N° 935
Spécial IA.
Ce qu'elle change

N° 936
Les pouvoirs de la respiration

▲ **Les bernaches cravants** migrent vers le littoral européen en septembre pour hiverner.

LAURENT LACHAUD MSI

Bordeaux (33) / Exposition

Migrations du vivant

Migration, immigration, émigration, migrants… Ces termes renvoient à des problématiques aux innombrables ramifications : dérèglement climatique, guerres, pauvreté…, mais souvent à travers le prisme humain. Cette exposition bordelaise aborde le sujet différemment. Conçue en deux parties sur deux sites, elle est rythmée par dix questions : pourquoi migrer ? vers où ? à quel rythme ? comment ? etc. Les réponses concernent tantôt la migration des végétaux (les aigrettes du pissenlit lui permettent de disperser ses graines dans le vent), tantôt celle des animaux (6000 km parcourus par la tortue luth pour rejoindre son lieu de ponte) ; et les insectes ne sont pas en reste (le papillon belle-dame effectue sa migration de milliers de kilomètres sur plusieurs générations). *« L'intention de cette exposition est avant tout de replacer le phénomène de la migration au cœur de la sphère du vivant dans son ensemble,* résume Nathalie Mémoire, directrice du muséum d'Histoire naturelle de Bordeaux. *Il s'agit de faire comprendre au public le rôle important que le phénomène a toujours joué dans l'évolution et l'adaptation des êtres vivants face aux changements de leur environnement. Sans migration, il n'y a pas de vie, tout simplement. »* Lire notre reportage : sciav.fr/936migrations ■ **Abir Rezgui**

Muséum d'Histoire naturelle, 5, place Bardineau et Jardin botanique, Esplanade Linné, jusqu'au 9 novembre. Rens. : 05.24.57.65.30.

EXPOSITIONS

Annecy (74)

Illusions
Une trentaine de dispositifs interactifs pour découvrir comment le cerveau peut être trompé. Les illusions reposent sur des ressorts physiques, biologiques ou cognitifs.
La Turbine sciences, place Chorus, jusqu'au 31 août. Réservation obligatoire : 04.85.46.74.30.

La Rochelle (17)

Vanuatu, pouvoir des femmes
À travers des objets, des photographies et des vidéos, l'histoire de la place des femmes dans la société traditionnelle du Vanuatu est retracée, entre ethnographie et art.
Muséum d'Histoire naturelle, 28, rue Albert-1er, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 05.46.41.18.25.

Marseille (13)

Nos zones humides, un trésor à préserver
Des photographies du Conservatoire des espaces naturels de la région mettent en valeur le rôle clé (et la fragilité) de ces milieux naturels en matière de lutte contre les inondations ou de captation du dioxyde de carbone.
Muséum d'Histoire naturelle, palais Longchamp, boulevard Philippon, jusqu'au 31 mars. Rens. : 04.91.14.59.50.

Nantes (44)

Trésors & biodiversité
Avant sa fermeture pour rénovation, le muséum raconte l'histoire de ses collections, des explorations du XIXe siècle, de l'évolution des pratiques muséales, avec une attention particulière pour les libellules.
Muséum d'Histoire naturelle, 12, rue Voltaire, jusqu'à fin 2025. Rens. : 02.40.41.55.00.

Paris (75)

Silence
Au fil d'un parcours libre, il est autant question du silence que du bruit. Les thèmes du Big Bang et de la neurasthénie y côtoient des histoires d'ermites ou la science des décibels.
Lire notre reportage : sciav.fr/937silence
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 31 août. Rens.: 01.85.53.99.74.

Migration : une odyssée humaine
À l'aide de données scientifiques, de témoignages et de travaux d'artistes, la question migratoire convoque ici anthropologie, démographie, archéologie, génétique, sociologie, loin des fantasmes.
Lire notre reportage : sciav.fr/937migration
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 8 juin. Rens. : www.museedelhomme.fr

Chiens et chats
L'exposition revient à la Cité des sciences après une période d'itinérance, avec des contenus renouvelés. Le sujet est traité sous les angles scientifique, culturel, sociologique, s'adressant aussi bien aux adultes qu'aux enfants.
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 28 juin 2026. Rens. : 01.85.53.99.74.

Rennes (35)

Fleurs, au-delà des apparences
Les fleurs participent à la biodiversité et à l'observation scientifique, elles marquent les saisons comme diverses étapes de la vie (mariages, fêtes, deuils). Dans nos sociétés industrialisées, elles restent néanmoins un objet méconnu.
Écomusée de la Bintinais, route de Châtillon-sur-Seiche, jusqu'au 31 août. Rens. : 01.99.51.38.15.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET/UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

En France aussi, nous avons basculé !

Les premiers jours de la présidence Trump plongent le monde dans le chaos et l'incertitude. Au-delà des droits humains piétinés et d'une purge dans l'administration américaine, ce sont les enjeux environnementaux qui sont potentiellement saccagés d'une signature. Entre les mots et les actes, il existe une marge… Mais les symboles comptent, pour ancrer un narratif anti-science qui s'accompagne le plus souvent de campagnes de désinformation pour mieux polariser, au service d'intérêts particuliers.

La protection du climat et de la biodiversité est maintenant présentée comme la « privation » extrême de liberté, « l'arme wokiste » qui sape le développement économique élevé au rang de rationalité suprême. Du jour au lendemain, l'expression « Climate change » a disparu des sites Web dépendant du gouvernement américain ; des projets scientifiques sont suspendus. L'obscurantisme s'installe. Le récit est-il si différent en France ? Les nouvelles lois agricoles discutées au Parlement ignorent ou minorent les faits scientifiques sur les pesticides, le rôle des haies, etc., au nom d'une vision ultraproductiviste et court-termiste de l'agriculture qui sacrifie la biodiversité et la sécurité sanitaire pour toutes et tous. Mêmes ficelles pour déconstruire, même narratif : la régulation entraverait la prospérité du monde agricole livrant à la vindicte populaire, sur la base de mensonges, l'Office français de la biodiversité. Quand un ministre déclare : *« La réalité dément les faits »*, actons que nous aussi, ici en France, nous avons basculé. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Équilibrer les tâches avec élégance

En informatique, on décerne des prix à des articles fondateurs. Ainsi en 2024, un article daté de 1994 a été primé. Il était intitulé « Balanced allocations » (répartition de charges). Le problème consiste à répartir des balles entre des boîtes pour éviter que certaines ne soient surchargées tandis que d'autres sont presque vides. Approche classique : si vous placez n boules dans n boîtes au hasard une par une, en moyenne chaque boîte contient une boule, mais le hasard peut faire que certaines en aient davantage. La plus remplie en a environ $\ln(n)/\ln(\ln(n))$ (ce qui fait entre 6 et 7, si n vaut 1 milliard). Si les boules sont des tâches et les boîtes des processeurs pour les exécuter, il faut donc prévoir des « salles d'attente » sufisamment grandes. Nouveauté de l'article primé : chaque boule, à son arrivée dans le système, examine le contenu de deux boîtes choisies au hasard et va se mettre dans la moins remplie des deux. Là encore, en moyenne chaque boîte contient une boule, mais cette fois-ci la plus remplie n'en a qu'environ $\ln(\ln(n))/\ln(2)$: entre 4 et 5, si n vaut 1 milliard. Cela permet donc de construire des « salles d'attente » plus petites. Asymptotiquement, la différence est énorme et l'article a également surpris par la simplicité de la méthode algorithmique. C'est en étant prêt à penser en dehors des clous qu'on fait de la recherche non incrémentale ! ■

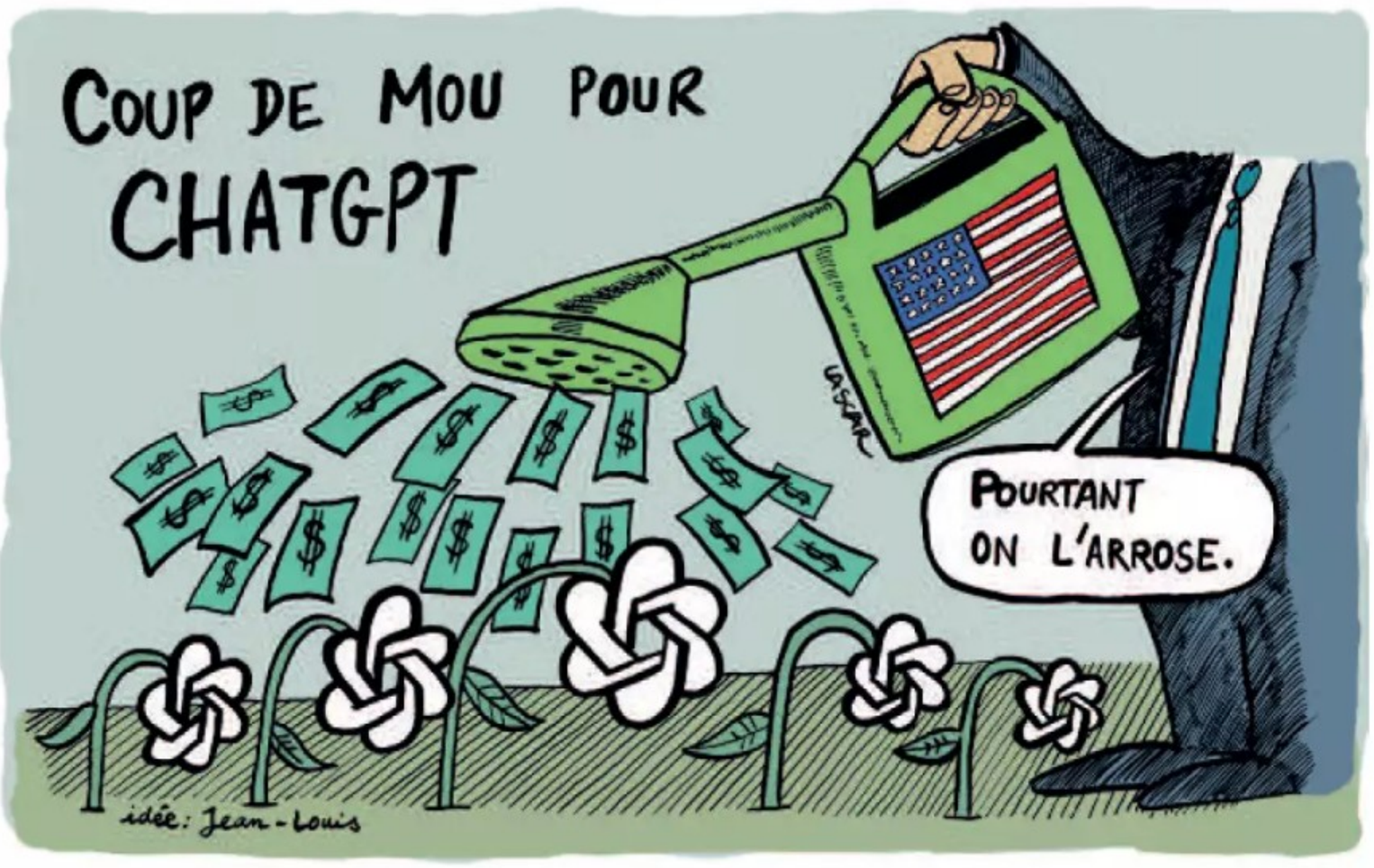
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Rétractation d'un article... plus de 4 ans après sa publication !

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Un article controversé et signé, entre autres, par le professeur Didier Raoult, a été rétracté le 16 décembre dernier. Paru en mars 2020, au début de la pandémie de Covid-19, il portait sur les prétendus effets curatifs de l'hydroxychloroquine. À une époque où l'on se trouvait tous dans l'expectative d'un traitement efficace, il ouvrait des perspectives salutaires au grand public soucieux de sa santé et peu familier de la démarche scientifique. Pourtant, très tôt, des chercheurs soulignèrent les multiples infractions aux bonnes pratiques qu'il contenait. Rappelons que l'étude portait sur 26 patients, ce qui à l'évidence était trop faible pour apporter une réponse fiable dans le cas d'une maladie dont le taux de létalité était, à l'époque, de l'ordre de 5 %. En effet, 5 x 26 % = 1,3, ce qui fait un peu plus d'un mort statistique sur l'échantillon… La faute à pas-de-chance! Qui plus est, 6 des 26 patients traités ont été arbitrairement retirés de l'étude, dont un a succombé et deux sont allés en réanimation. Enfin, le placement des sujets dans le groupe placebo n'était ni aléatoire, ni fait en double aveugle, ce qui signifie que les médecins savaient qui avait été traité. De surcroît, les conflits d'intérêts avec la revue en question, *International Journal of Antimicrobial Agents*, étaient manifestes puisque deux des coauteurs sont membres de son comité éditorial. Compte tenu de ces entorses à l'intégrité scientifique, l'étude aurait dû être récusée très tôt. Soulignons qu'on engage des procédures de rétractation dans trois cas de figure: une erreur de bonne foi, une fraude ou une appropriation indue du travail d'autrui, par exemple un plagiat. Ici, nous nous trouvons à l'évidence — et, point n'est besoin d'être un spécialiste pour s'en convaincre! — dans le second cas de figure. Comment se fait-il qu'il ait fallu attendre quatre ans pour s'en rendre compte? Il faut le déplorer. Mais, il faut plus encore déplorer l'incapacité qu'ont eue les scientifiques invités dans les médias à en convaincre le grand public. ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Vents contraires pour OpenAI, concepteur du fameux programme d'IA générative ChatGPT. L'irruption de son concurrent chinois DeepSeek qui prétend faire aussi bien (mieux?) pour moins cher et avec moins de microprocesseurs l'a fragilisé. Sur le plan judiciaire, la société affronte la plainte d'Elon Musk, soutenue par Mark Zuckerberg. Tous deux s'opposent à ce qu'OpenAI passe d'un statut non lucratif à celui d'une entreprise traditionnelle. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

GÉOLOGIE

Quelle est l'origine de la tectonique des plaques sur Terre ?

Gabriel B.

La Terre est la seule planète connue animée d'une tectonique des plaques, mais on ignore toujours ce qui lui a donné naissance. Dernière théorie en date : celle d'un géodynamicien du Caltech de Pasadena (États-Unis), qui a suggéré en 2023 que ce phénomène aurait été enclenché par la collision, il y a 4,5 milliards d'années, d'une protoplanète, Théia, avec la jeune Terre. Cet impact aurait engendré une fonte à l'échelle planétaire. Des morceaux de Théia auraient sombré au plus profond du manteau, mobilisant de grandes remontées de magma en panaches, bloqués en surface par la couche externe. Celle-ci aurait été fracturée par ces panaches avant qu'ils ne replongent dans le manteau, déclenchant le début de la subduction, c'est-à-dire de l'enfoncement d'une plaque tectonique sous une autre. ■ **Sylvie Rouat**

BOTANIQUE

Combien y a-t-il d'arbres sur la planète ?

Sébastien L.

Environ 3000 milliards ! C'est en tout cas l'estimation d'une équipe de chercheurs dirigée par l'université Yale (États-Unis). Les forêts tropicales et subtropicales, comme l'Amazonie ou le bassin du Congo, abritent 43 % des arbres mondiaux, tandis que les forêts boréales de l'hémisphère Nord, composées majoritairement de conifères, en accueillent 24 %. Chaque année, ce sont environ 15 milliards d'arbres qui disparaissent en raison de la déforestation. Ainsi, depuis le début de l'agriculture, il y a environ 12 000 ans, leur nombre sur la planète aurait diminué de 46 %. ■ **L. L.**

LAURENT GRANDGUILLOT/REA

La construction d'un caveau et l'origine lointaine des matériaux utilisés rendent l'inhumation particulièrement énergivore.

ENVIRONNEMENT

Crémation ou inhumation : laquelle est plus écologique ?

Gérard C.

L'inhumation s'avère particulièrement énergivore. Selon un rapport paru en 2018, elle émet en moyenne 833 kg de dioxyde de carbone (CO_2) sur 30 ans, soit l'équivalent de 4023 km parcourus en voiture. Ce chiffre inclut tout, du transport du corps à l'entretien du cimetière. Mais c'est le choix du monument funéraire qui pèse le plus lourd dans la balance. À l'enterrement en pleine terre, qui génère 182 kg de CO_2, s'ajoutent ainsi l'impact de la construction d'un caveau en ciment et celui de l'origine des matériaux : bien que le granit français existe, 80 % des monuments funéraires sont importés de Chine, générant jusqu'à 1252 kg de CO_2 ! Par ailleurs, les produits chimiques utilisés pour la thanatopraxie (formaldéhydes, glycols, phénols, glycérines) contaminent les sols ou se libèrent dans l'atmosphère lors de l'incinération, augmentant pour la population le risque de troubles respiratoires, de lésions au foie et aux reins, voire celui de cancers.

Quant à la crémation, elle produit environ 233 kg de CO_2 par corps, soit un tiers de l'empreinte d'un enterrement classique. Les émissions proviennent majoritairement du gaz utilisé pour alimenter les fours (56 %), suivi des infrastructures des crématoriums et du cercueil. Si le carton est parfois vu comme une alternative écologique, il brûle moins bien que le bois, augmentant ainsi la consommation de gaz. Pour réduire l'empreinte carbone, le Danemark réutilise la chaleur générée par les crématoriums pour chauffer des bâtiments voisins. Une idée encore taboue en France. ■

Lise Loumé

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

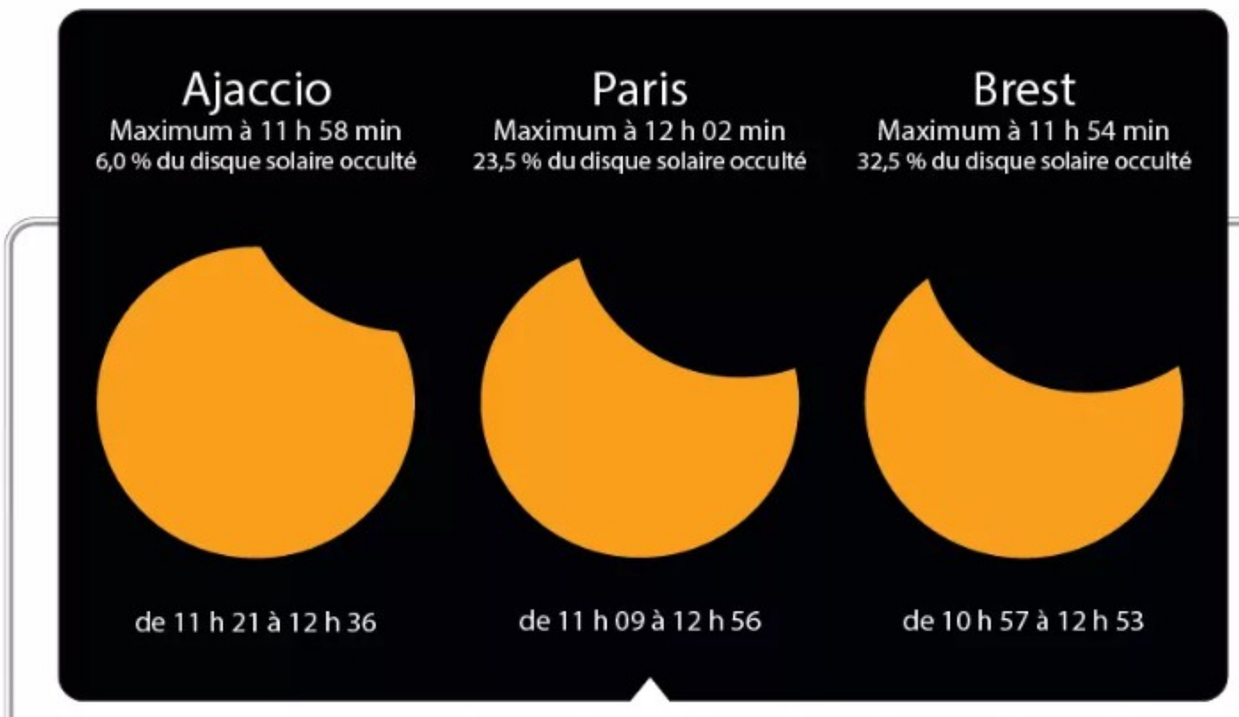
MERCURE La plus petite des planètes atteint sa plus grande distance (18°) à l'est du Soleil le 8. Elle est assez facilement observable en soirée vers le couchant durant les deux premières semaines de mars. Mercure passe en conjonction inférieure, c'est-à-dire dans la direction du Soleil, le 24.

VÉNUS Si l'étoile du Berger domine encore l'horizon ouest de son éclat étincelant en début de mois, elle plonge jour après jour vers le couchant et voit sa hauteur diminuer régulièrement. Elle passe en conjonction inférieure le 23.

MARS Lorsque la nuit tombe, la planète Rouge est proche de sa culmination. Très haute dans le ciel de début de nuit, elle n'est plus aussi brillante qu'en janvier mais demeure néanmoins très facilement repérable dans la constellation des Gémeaux. Son éclat perd encore 50 % au cours du mois.

JUPITER La planète géante est déjà sur la pente descendante de sa trajectoire dans notre ciel quand s'installe l'obscurité. Elle brille intensément dans le Taureau, au sein d'une région riche en étoiles brillantes.

SATURNE La planète aux anneaux passe en conjonction le 12 et n'est pas observable ce mois.



Aspect du Soleil à l'instant du maximum de l'éclipse à Ajaccio, Paris et Brest. Heure de ce maximum, pourcentage du disque solaire alors occulté et horaires de l'éclipse pour ces trois villes.

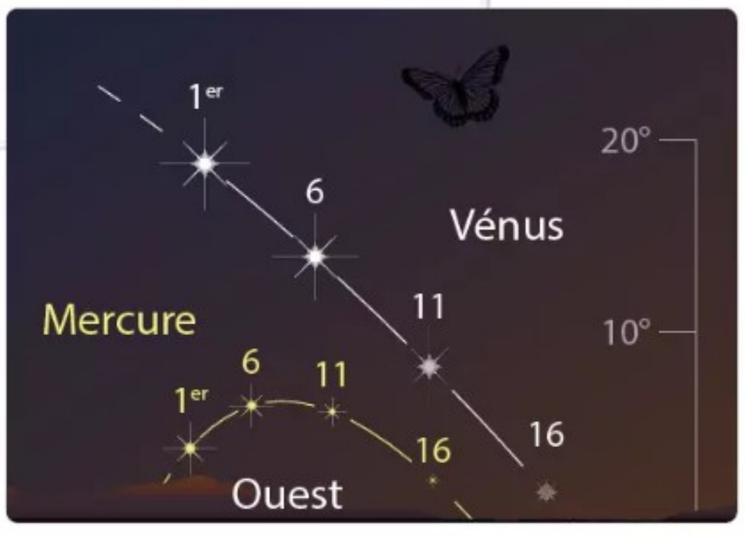
Une éclipse de Soleil pour fêter le printemps

SAMEDI 29, une éclipse partielle de Soleil sera visible partout dans l'Hexagone. Son maximum prendra place entre 11 h 50 et 12 h 10 environ, en fonction de votre localisation. L'astre du jour se situera alors à quelque 45° de hauteur. Les habitants du nord-ouest de la France seront privilégiés par rapport à ceux du Sud-Est.

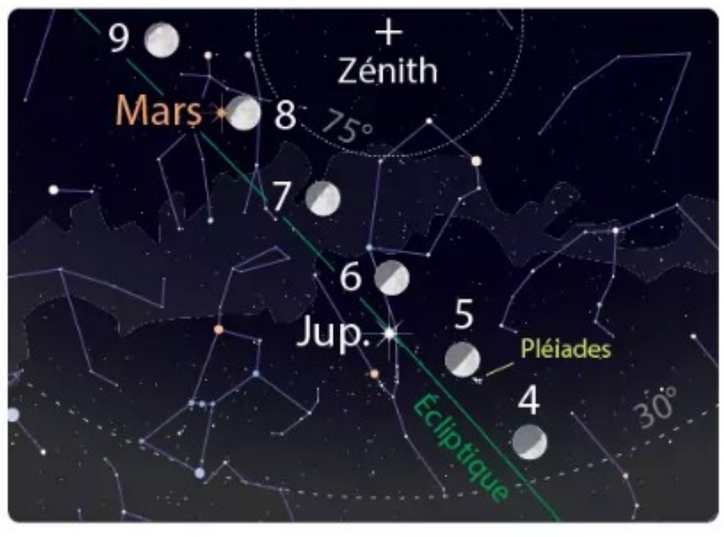
Notre conseil Il sera impératif de porter des lunettes filtrantes conçues pour l'observation des éclipses. Elles réduisent l'intensité lumineuse et bloquent les rayonnements nocifs pour l'œil émis par le Soleil.

L'appli du mois

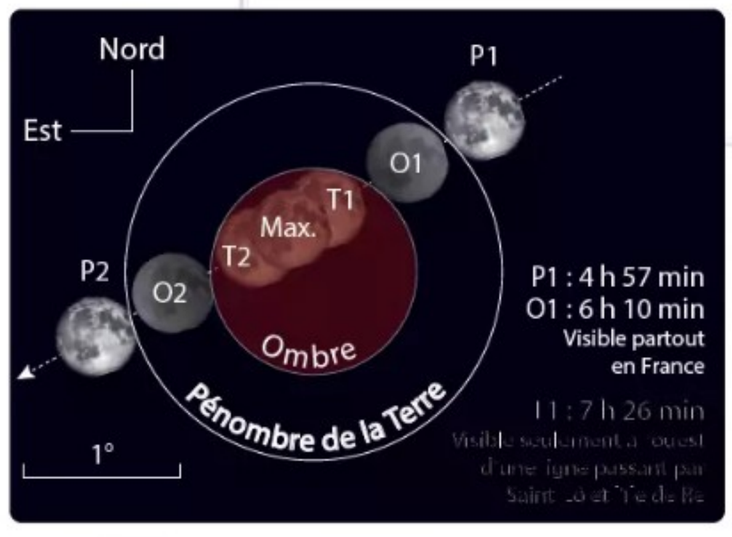
ECLIPSE CALCULATOR 2 est une application gratuite en anglais pour Android. Elle permet de calculer les caractéristiques et de simuler les éclipses solaires et lunaires entre 1550 et 2300, ainsi que les transits de Mercure et de Vénus. Elle offre des cartes interactives et des simulations détaillées pour tout lieu d'observation.



EN PREMIÈRE MOITIÉ DE MOIS, OBSERVEZ LES PLANÈTES VÉNUS ET MERCURE 1 h après le coucher du Soleil, vers l'ouest. Leur position est donnée les 1er, 6, 11 et 16 mars.



DU 4 AU 9 VERS 21 H, SUIVEZ LA LUNE EN PHASE CROISSANTE. Elle se trouvera non loin de l'amas d'étoiles des Pléiades le 5, de la brillante Jupiter le 6 et de Mars le 8.



DANS LA NUIT DU 13 AU 14, SEULES LES PREMIÈRES PHASES d'une éclipse totale de Lune seront observables en France, peu avant le coucher de la Lune au petit matin.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de mars

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

2025 !!!

Vous êtes maintenant solidement ancré dans l'année 2025 mais avez-vous réfléchi à toutes les implications de son numéro ? Avez-vous par exemple remarqué que 2025 peut s'obtenir comme résultat d'un calcul utilisant exactement tous les chiffres de 1 à 9, l'un d'eux étant utilisé une seconde fois ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 et ?

Bancal, Docteur ?

En piochant dans cette liste de mots, passez de BANCAL à DOCTEUR en utilisant 12 mots intermédiaires. Chaque mot doit commencer par la dernière syllabe du mot précédent sans s'occuper des accents (exemples : CHEVAL - VALSE - SEMIS, etc.).

POUPON DIGNE TONTE NORMAL RIPOU MELO
CALMAR PONTIF MEDOC NECTAR LIEVRE MARTEAU
TENOR TONDU DIVA CHEVRE PONTON RIANT TARMAC
CHERI TETIN RADON NORME VALEUR MARDI POUDRE
CALIN VACHE POTIN SURET MINOU CHENU LUNDI
METRO POULET CHATON

Machiavel bouleversé

Quel bouleversement systématique a subi cette citation de Machiavel ?

Gouverne le hasard plus un peu moitié de la actions de nos dirigeons et nous reste ce qui.

2025 et ses cubes

L'année présente a l'avantage d'être un carré parfait : 45 x 45 mais cela n'exclut pas une présence cubique. Saurez-vous trouver comment 2025 est un assemblage de cubes arithmétiques ?

Menue logique

Quelle est la logique de ce menu et quel prix devrait être affiché pour le café ?

Menu

Soufflé du patron	2
Osso buco	3
Bœuf mode	2
Fromages de saison	2
Poires Belle-Hélène	1
Café	?

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 936, février 2025

Trajet numérique

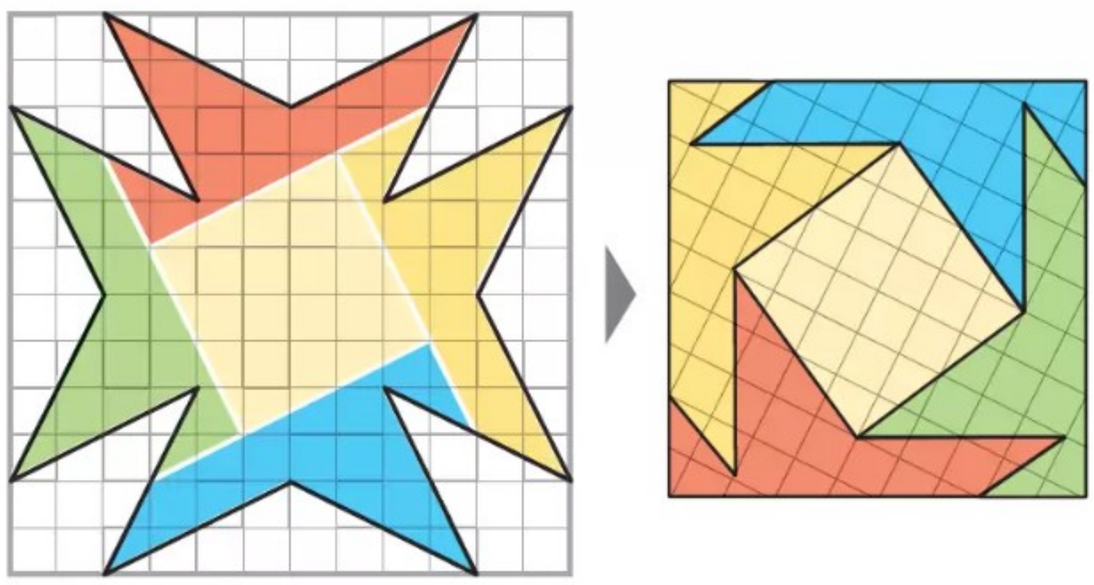
21, 22, 57, 25, 42, 65, 24, 35, 51, 62

Printemps alphabétique

49 012 + 38 512 = 87 524

Multiplication trouée

On s'aperçoit facilement que l'un des termes de la multiplication est divisible par 9 (en fait les deux le sont). Le résultat doit donc l'être aussi. La somme des chiffres doit donc faire 9. Comme les chiffres visibles font un total final de 1, le manquant est un 8.



De Malte à Pythagore

Solution publiée par Greg Frederickson chez Dover en 1972.

Logique de nom

Mon nom est NOIR.

En effet, TEST retire E et T des trois premiers, ce qui ne laisse que R, A, O, I, N. Ensuite, la place des lettres ne laisse qu'une seule possibilité.

Carlo d'Asaro Biondo et Francis Morel

Un livre pour tous, pour comprendre et agir plutôt que subir

CALMANN LEVY
ÉDITEUR DEPUIS 1836

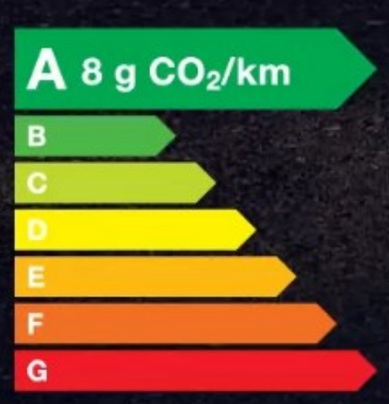
Nouvelle Golf eHybrid

Partez en électrique, arrivez au volant d'une thermique.

Bénéficiez de la Prime Eco VW de 4 000 € (1)

Nouvelle technologie Volkswagen eHybrid.

Jusqu'à 143 km d'autonomie en 100 % électrique et jusqu'à 943 km d'autonomie cumulée(2), **vous avez enfin une bonne raison de ne pas choisir.**



Modèle présenté : Nouvelle Golf eHybrid Style avec option peinture métallisée incluse. Plus d'informations sur volkswagen.fr (1) Prime Eco VW de 4 000 € (remise conseillée dans le réseau participant) applicable sur le prix d'achat d'une Nouvelle Golf eHybride neuve, **du 01/02/2025 au 28/02/2025 et immatriculation avant le 30/09/2025.** Plus d'information auprès de votre Partenaire. (2) Distance totale maximum en combinaison essence/électrique pour une Nouvelle Golf eHybrid dont 143 km en 100 % électrique, données WLTP. L'autonomie réelle en mode tout électrique dépend de nombreux paramètres dont l'équipement, le style de conduite et la vitesse.

Cycles mixtes de la gamme Nouvelle Golf 1.5 eHybrid (l/100 km) WLTP : 0,3–0,4. Rejets de CO_2 (g/km) WLTP : 6-8. Valeurs au 15/02/2024, susceptibles d'évolution. Plus d'informations auprès de votre Partenaire.

Volkswagen Group France – SAS au capital de 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne, Villers-Cotterêts
RCS Soissons 832 277 370.

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo #SeDéplacerMoinsPolluer